

Superhydrophobie und Selbstreinigung: Wirkungsweise, Effizienz und Grenzen bei der Abwehr von Mikroorganismen

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Zdenek Cerman

aus

Falkenau
(Tschechien)

Bonn, Juni 2007

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

Erstgutachter: Prof. Dr. Wilhelm Barthlott
Zweitgutachter: Prof. Dr. Christoph Neinhuis

Tag der mündlichen Prüfung: 16.10.2007

Erscheinungsjahr: 2007

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Meinen Eltern Krista und Zdenek Cerman

Danksagung

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Wilhelm Barthlott für die Vergabe des Themas. Er begleitete die Arbeit nicht nur mit wertvollen Ideen und kritischen Diskussionen, sondern ermutigte mich auch dazu eigene Ideen zu entwickeln und neue Ansätze auszuprobieren. Seine Unterstützung reichte weit über die eigentliche Doktorarbeit hinaus und förderte in hohem Maße meine persönliche Entwicklung.

Prof. Dr. Christopf Neinhuis (Botanisches Institut, Universität Dresden) danke ich für die Übernahme des Koreferats. Seine Begeisterung für unbenetzbare Oberflächen und jahrzehntelange Erfahrung auf diesem Gebiet waren von großer Bedeutung für das Gelingen dieser Arbeit.

Eine wichtige Voraussetzung für die Durchführung der Dissertation war die Förderung des Projektes „Baustoffe mit Lotus-Effekt“ finanziert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU). Die hier vorgelegte Arbeit bildete einen wichtigen Baustein des dreieinhalbjährigen Projekts. Weitere wichtige Unterstützung bildete das Projekt Biokon, ein deutschlandweites Bionik-Netzwerk, finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). An dieser Stelle seien namentlich ganz besonders Dr. Lay (DBU) und Karl Wollin (BMBF) hervorgehoben.

Für die Arbeit unverzichtbare Unterstützung leisteten unsere Industriekooperationspartner, die mir Proben und Materialien zur Verfügung stellten. Namentlich seien an dieser Stelle Dr. Reiner Fürstner (Sto AG), Dr. Axel Thierauf und Dr. Alexander Stoll (Erlus Baustoffwerke AG), Andrea Tietze, Dr. Werner Michel sowie Dr. Felix Müller (Degussa AG) genannt.

Wichtige Hilfe erhielt ich auch von Mitarbeitern anderer Institute und Universitäten. Vom Institut für Pflanzenkrankheiten in Bonn danke ich PD Dr. Steiner-Stenzel und ihrem Kollegen PD Dr. Oerke für die inhaltliche Begleitung, die wertvollen Ideen und die Lieferung von Material für die Untersuchungen zum Pathogenbefall von Pflanzen, sowie die Bereitstellung einer Thermographiekamera. Dr. Uwe Braun vom Institut für Geobotanik und Botanischer Garten der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg half mir bei der Bestimmung des Pilzes von *Nelumbo nucifera*. Prof. Dr. Thomas Friedel (Universität Göttingen), Dr. Georg Gärtner (Universität Innsbruck) und Dr. Gijsbert Lockhorst (Nationaalherbarium der Niederlande) danke für die Unterstützung bei der Bestimmung der verwendeten Algen. Prof. Dr. Andreas Bott vom Meteorologischen

Institut der Universität Bonn stellte freundlicherweise Niederschlagsdaten für die Zeiträume der Untersuchungen zum Pathogenbefall von Lotus zur Verfügung.

Unentbehrliche Unterstützung leisteten auch Anne Stosch und Bernd Mockenhaupt, die mit ihren Diplomarbeiten wichtige Grundlagen und einen unverzichtbaren Beitrag geleistet haben. Der Arbeitsgruppe Bionik danke ich für die Unterstützung und Hilfe bei Versuchen sowie für viele interessante Ratschläge. Mein besonderer Dank gilt Dr. Andreas Solga, der mich mit seiner Erfahrung und aufmunternden Worten besonders in der Endphase dieser Arbeit motivierte. In unterschiedlichen Belangen gaben Wolfgang Roden, Hans-Jürgen Ensikat, Rose Pretscher und Brigitte Dederichs Hilfestellungen.

Für die Korrektur der Arbeit und kritische Anmerkungen zum Manuskript bin ich Dr. Andreas Solga und ganz besonders meiner Frau Anne Stosch zu großem Dank verpflichtet.

Zum Schluss noch mein inniger Dank an die Menschen, die mich auf dem langen Weg bis zur Beendigung meiner Dissertation begleitet haben. In Zeiten großer Herausforderungen und Schwierigkeiten half mir meine Frau Anne Stosch mit ihrem Zuspruch und dadurch, dass sie es immer wieder geschafft hat, mich in aufregenden und hektischen Zeiten zu beruhigen und mich wieder aufs Neue zu motivieren. Dafür bin ich Ihr von ganzem Herzen dankbar. Ohne die große Unterstützung meiner Eltern, die stets an mich geglaubt haben und mich in allen Belangen förderten, wäre diese Arbeit niemals zustande gekommen. Ihnen möchte ich deshalb diese Arbeit widmen.

Inhaltsangabe

1.	Einleitung	2
1.1	Pflanzliche Grenzflächen	4
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	5
2.	Material und Methoden – Allgemeiner Überblick	7
2.1	Material	7
	Blütpflanzen	7
	Algen	7
	Pilze	8
	Technische Oberflächen	8
2.2	Methoden	9
	Rasterelektronenmikroskopie	9
	Kontaktwinkelmessung	10
	Hydrophobierung	11
	Statistische Auswertung	11
3.	Superhydrophobie und Selbstreinigung: Stand des Wissens	13
	Definition und Terminologie	13
	Physikalische Grundlagen der Benetzung	15
	Benetzung strukturierter hydrophober Oberflächen	18
	Dynamisches Verhalten von Tropfen auf superhydrophoben Oberflächen	22
	Abrollwinkel auf superhydrophoben Oberflächen	27
	Mögliche Benetzungszustände auf strukturierten Oberflächen	29
	Bedeutung von Strukturhierarchien für die Unbenetzbarkeit	34
	Herstellung superhydrophober Oberflächen	36
	Weiterführende Untersuchungen an superhydrophoben Oberflächen	46
	Anwendung superhydrophober Oberflächen in der Technik	48
3.1	Extrem unbenetzbare Oberflächen in der Natur	48
3.2	Selbstreinigende superhydrophobe Oberflächen	51
4.	Modellsystem Weizen und Mehltau: Auswirkung von Niederschlägen auf den Befall unter Laborbedingungen	54
4.1	Wirt-Pathogen-Beziehungen zwischen Pflanzen und Pilzen	55
	Wirt-Pathogen-Beziehung Weizen und Echter Mehltau	58
4.2	Material und Methoden	62
	Pflanzenmaterial	62
	Inokulum	63
	Kontaktwinkelmessung	63
	Rasterelektronenmikroskopie	64
	Probenvorbereitung für Selbstreinigungstest und Inokulation	64

Selbstreinigungstest	65
Inokulation mit Konidien	66
Simulierte Beregnung und Beneblung	67
Befallsermittlung	68
Zusammenfassung des Versuchsablaufs zum Einfluss der Niederschläge auf den Befall von Weizen mit <i>B. graminis</i>	70
4.3 Ergebnisse	71
Charakterisierung der Weizenblätter	71
Benetzung der Weizenblätter	71
Selbstreinigung der Weizenblätter	71
Befall nach Beneblung im zeitlichen Verlauf	72
Befall nach Beregnung im zeitlichen Verlauf	74
Befallsänderung bei Beneblung im zeitlichen Verlauf	76
Befallsänderung bei Beregnung im zeitlichen Verlauf	78
Keimrate nach simulierter Beneblung	80
Keimrate nach simulierter Beregnung	81
Einfluss der Faktoren Wachs (intakt/zerstört) und Sorte auf die Anzahl der Konidien bei simulierter Beneblung	81
Einfluss der Faktoren Wachs (intakt/zerstört) und Sorte auf die Anzahl der Konidien bei simulierter Beregnung	82
4.4 Diskussion	83
Unbenetzbarkeit der Weizenblätter	83
Effizienz der Selbstreinigung von Weizenblättern	84
Abreinigung von <i>B. graminis</i> Konidien mittels simulierten Niederschlägen	85
Abreinigung von Konidien in Abhängigkeit des Zeitintervalls zwischen Inokulation und Niederschlag	86
Keimrate von <i>B. graminis</i> auf Weizen in Abhängigkeit der Oberflächenstruktur	89
Belegungswerte über 100%	90
4.5 Folgerungen	91
5. Modellsystem Lotus und Mehltau: Auswirkungen von Niederschlägen auf den Befall unter Freilandbedingungen	93
5.1 Die Lotuspflanze: Synonym für Selbstreinigung	93
5.2 Pathogene von <i>Nelumbo nucifera</i>	94
5.3 Material und Methoden	95
Pflanzen	95
Versuchszeiträume	96
Behandlungsvarianten	96
Probenentnahme	98
Befallsermittlung	98
Pilzbestimmung	101
Auswertung	102
Erfassung der Umgebungsparameter	102
Niederschlagsdaten	102

5.4	Ergebnisse	103
	Der Pilz von <i>N. nucifera</i>	103
	Umgebungsbedingungen	104
	Niederschläge	108
	Pilzbefall von <i>N. nucifera</i>	109
5.5	Diskussion	113
	Der Pilz	113
	Umgebungsbedingungen in Abhängigkeit einer Überdachung der Lotuspflanzen	113
	Der Befall von <i>N. nucifera</i> in Abhängigkeit von Niederschlägen	113
	Probleme bei der Befallsbestimmung	117
5.6	Folgerungen	118
6.	Modellsystem Algen und Baustoffe: Wachstum in Abhängigkeit der Benetzbarkeit	119
6.1	Algen	120
	Aeroterrestrische Algen	121
6.2	Mikrobielle Materialszerstörung	121
6.3	Simulation mikrobieller Besiedlung	124
6.4	Chlorophyllfluoreszenz	127
6.5	Material und Methoden	129
	Verwendete Algen	129
	Technische Oberflächen	129
	Kontaktwinkelmessung	130
	Rasterelektronenmikroskopie	131
	Versuchsaufbau	131
	Lagerung der Prüfkörper in der Klimakammer	132
	Simulierte Beregnung	133
	Inokulation der Prüfkörper	135
	Messung des Algenbewuchses über die Fluoreszenzintensität	136
6.6	Ergebnisse	140
	Kontaktwinkel	140
	Ergebnisse der Nassinokulation I (NA I)	141
	Ergebnisse der Nassinokulation II (NA II)	143
6.7	Diskussion	145
	Benetzungsverhalten der Fassadenfarben	145
	Wachstum von Algen auf Fassadenfarben	145
	Benetzungsverhalten der Dachziegel	147
	Wachstum von Algen auf Dachziegeln	148
	Erfassung der Chlorophyllfluoreszenz	149
6.8	Folgerungen	150

7.	Einfluss der Kondensation auf die Superhydrophobie	152
7.1	Material und Methoden	152
	Pflanzen	152
	Technische Oberflächen	153
	Versuchsbeschreibung	154
	Kontaktwinkelmessung	155
	Abrollwinkelmessung	156
	Vorrichtung zur Regelung der Oberflächentemperatur	156
	Thermographische Messungen	158
	Rasterelektronenmikroskopie	158
7.2	Ergebnisse	159
	Charakterisierung der pflanzlichen Oberflächen	159
	Charakterisierung der technischen Oberflächen	161
	Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Kontaktwinkel von Wasser bei Pflanzen	162
	Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Abrollwinkel von Wasser bei Pflanzen	171
	Vergleichende Betrachtung des Benetzungsverhaltens von Wasser auf gekühlten pflanzlichen Oberflächen bei einer Temperaturdifferenz von -15°C	179
	Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Kontakt- und Abrollwinkel von Glycerin bei ausgewählten Pflanzen	180
	Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Kontaktwinkel von Wasser bei technischen Oberflächen	186
	Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Abrollwinkel von Wasser bei technischen Oberflächen	188
	Einfluss der Oberflächentemperatur auf Kontakt- und Abrollwinkel von Glycerin bei technischen Oberflächen	191
	Kontaktwinkeländerung auf gekühlten Oberflächen in Abhängigkeit der Zeit	195
7.3	Diskussion	202
	Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf gekühlten, pflanzlichen Oberflächen	202
	Änderung des Abrollwinkels von Wasser auf gekühlten, pflanzlichen Oberflächen	205
	Vergleichende Betrachtung des Benetzungsverhaltens von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen bei einer Temperaturdifferenz von -15°C	208
	Vorkommen des Cassie- und Wenzelbenetzungszustands in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur	212
	Änderungen des Kontakt- und Abrollwinkels von Glycerin auf gekühlten pflanzlichen Oberflächen	213
	Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf gekühlten, technischen Oberflächen	214
	Änderung des Abrollwinkels von Wasser auf gekühlten, technischen Oberflächen	217

Änderungen des Kontakt- und Abrollwinkels von Glycerin auf gekühlten technischen Oberflächen	219
Kontaktwinkeländerung auf gekühlten Oberflächen in Abhängigkeit der Zeit	220
7.4 Folgerungen	223
8. Schlussbetrachtung	224
9. Ausblick	225
10. Zusammenfassung	227
11. Summary	231
12. Literaturverzeichnis	235
13. Abbildungsverzeichnis	273
14. Tabellenverzeichnis	282
Anhang	283

Häufig verwendete Abkürzungen

AW	Abrollwinkel
EPS	Extrazelluläre polymere Substanzen
KW	Kontaktwinkel
MO	Mikroorganismen
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung
PE	Peltier Element
REM	Rasterelektronenmikroskop
CVD	Chemische Gasphasenabscheidung

Anmerkung:

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit selbstreinigenden, unbenetzbaren pflanzlichen und technischen Oberflächen. Im allgemeinen Sprachgebrauch, inzwischen sogar in der Fachliteratur, wird zur Beschreibung dieser Oberflächeneigenschaft immer häufiger der Begriff „Lotus-Effekt“ oder die englische Variante „Lotus-Effect“ verwendet. Dieser Begriff ist ein eingetragenes Markenzeichen, das ausschließlich zur Kennzeichnung von Produkten verwendet werden darf. Aus diesem Grunde wird in der vorliegenden Arbeit die Marke Lotus-Effekt® auch als Kürzel nicht eingesetzt.

1. Einleitung

Bemühungen um Innovationen und neuartige Technologien motivieren weltweit Unternehmen zur Suche nach immer neuen Ansätzen und Ideen. Ein aktueller Fokus bei der Suche richtet sich auch auf die Natur. In der Biologie existieren durch die fortwährende Anpassung der Organismen an sich ständig verändernde Umweltbedingungen Millionen biologischer „Erfindungen“, deren Leistungen technisch meist unerreicht sind. Schon immer nutzte der Mensch die Biologie als Vorbild für die Technik. Sein Streben, sich wie ein Vogel in die Luft zu erheben, führte letztendlich zur Entdeckung des Auftriebs, wodurch der Grundstein für die Luftfahrt gelegt wurde. Die moderne Technik mit immer raffinierteren Analysemethoden, immer schnelleren und leistungsfähigeren Computern ermöglicht heute ein zunehmend besseres Verständnis der biologischen Vorbilder. Dieses Verständnis ist der Schlüssel für eine erfolgreiche Übertragung in die Technik (Sanchez *et al.*, 2005). Die Wissenschaftsdisziplin, die sich systematisch mit der Übertragung biologischer Konstruktionen und Verfahren in die Technik beschäftigt, heißt Bionik (Nachtigall & Neumann, 1993). Ein deutliches Zeichen für das in den letzten Jahren gesteigerte Interesse der Industrie an biologisch inspirierten Technologien ist im starken Zuwachs an Patenten in diesem Bereich zu sehen (Bonser, 2006). Inzwischen existieren zahlreiche Produkte und Erfindungen auf dem Markt, die auf biologische Inspirationen zurückzuführen sind. Einen Überblick über die Geschichte der Bionik und ihre Teilgebiete liefert Nachtigall (1998). Aktuelle Forschungsprojekte werden in dem Sachbuch „Erfindungen der Natur“ vorgestellt (Cerman *et al.*, 2005).

Ein herausragendes Beispiel für die Übertragung eines biologischen Phänomens in die Technik ist eine inzwischen bei vielen Produkten integrierte Oberflächenmodifikation, die zur Unbenetzbarkeit und Selbstreinigung führt. Diese Technologie geht zurück auf die Entdeckung selbstreinigender Eigenschaften bestimmter pflanzlicher Oberflächen (Barthlott & Ehler, 1977); (Barthlott & Wollenweber, 1981); (Barthlott & Neinhuis, 1997); (Neinhuis & Barthlott, 1997). Die genannten Arbeiten deckten einen bis dato unbekanntem Effekt unbenetzbarer Oberflächen auf. Obwohl die Unbenetzbarkeit strukturierter, hydrophober Oberflächen zu diesem Zeitpunkt ein bereits gut untersuchtes Phänomen war und auch entsprechende technische Oberflächen existierten (s. Kap. 3), weckte diese Entdeckung neues Interesse an der Erforschung dieser Oberflächen. Die Arbeiten fanden große öffentliche Beachtung, in der Folge wurde auch das Interesse der Industrie an dieser Technologie geweckt. Die Aufwertung von bereits bestehenden Produkten durch den gezielten Einsatz von

Oberflächenmodifikationen stellt technisch einen verhältnismäßig geringen Aufwand dar. Noch immer bestehen in diesem Zusammenhang aber viele ungeklärte Fragen. Bis heute diskutieren Forscher über die optimalen Dimensionen und die Gestalt der Oberflächenstrukturen, um Unbenetzbarkeit und Selbstreinigung hervorzurufen. Weitere Fragen sind die Dauerhaftigkeit der Oberflächen im Praxiseinsatz, das Verhalten von Wasser auf diesen Oberflächen oder die Grenzen dieser Technologie (s. Kap. 3).

Eben solchen Fragestellungen widmet sich auch die vorliegende Arbeit. Ein wichtiger, bislang noch ungeklärter Punkt in diesem Zusammenhang ist die Effizienz der Selbstreinigung als Schutz gegen Mikroorganismen (s. Kap. 4 u. 5). In selbstreinigende Oberflächen werden hohe Erwartungen gesetzt, da bei einer erfolgreichen Abwehr der Mikroorganismen auf toxische Biozide bei Baustoffen verzichtet werden könnte (s. Kap. 6). In der Baustoffbranche wird dieses Thema sehr kontrovers diskutiert, da insbesondere Biozidhersteller wenig Interesse an ökologischen Alternativlösungen haben.

Ein weiterer Punkt, der im Zusammenhang mit der Anwendung selbstreinigender Oberflächen im Freiland diskutiert wird, ist der Einfluss von Kondensation auf die Unbenetzbarkeit. Von Festkörperphysikern erstmals vor wenigen Jahren vorhergesagt und auch experimentell belegt (Lafuma & Quéré, 2003), ist eine Veränderung der Benetzbarkeit solcher Oberflächen unter bestimmten Temperatur- und Feuchtebedingungen möglich (s. Kap. 7). Eine Änderung der Benetzungszustände könnte die Einsatzgebiete selbstreinigender Oberflächen dramatisch verringern und sogar die Verwendung der Technologie bei vielen Anwendungen im Freiland gänzlich in Frage stellen.

Den Schlüssel zur Beantwortung der vielen noch offenen Fragen bilden als optimierte Vorbilder die pflanzlichen Grenzflächen selbst.

1.1 Pflanzliche Grenzflächen

Die Entwicklung einer schützenden Grenzfläche ermöglichte Pflanzen vor ca. 450 Mio. Jahren den Schritt vom Wasser aufs Land. Erst durch die Entstehung der Kutikula, die das primäre Abschlussgewebe aller Organe der Gefäßpflanzen und vieler Moose, mit Ausnahme der Wurzeln, bildet, wurden Pflanzen vor Austrocknung und Strahlung geschützt. Die Kutikula ist ein integraler Bestandteil der Epidermis. Diese ist bei allen höheren Pflanzen ähnlich aufgebaut. Der Protoplast (lebender Zellkörper) ist von einer Zellwand, die hauptsächlich aus Zellulose besteht, umschlossen. Die Zellwand wird nach Außen hin über eine Pektinschicht mit der Kutikula verbunden. Die Kutikula ist ein transluzenter Polymerfilm mit einem komplizierten Feinbau, bestehend aus Lipiden und gelösten Wachsen. Über Zusammensetzung, Entstehung und Funktion der Kutikula wird aktuell und umfassend bei Jeffree (2006) berichtet. Die Kutikula ist zudem mit epikutikularen Wachsen überzogen, die für viele Eigenschaften der Grenzfläche eine zentrale Rolle spielen. Die chemische Zusammensetzung der Wachse wurde inzwischen umfassend untersucht (Baker, 1982; Jeffree, 1986; Kolattukudy *et al.*, 1976; Martin & Juniper, 1970). Die epikutikularen Wachse bilden in Selbstorganisationsprozessen Filme und hochkomplexe dreidimensionale Strukturen aus, die maßgeblich durch die chemische Zusammensetzung bestimmt werden (Ensikat *et al.*, 2006). Deren Morphologie und Terminologie beschreiben Jeffree (1986) und Barthlott *et al.* (1998). Neuste Erkenntnisse über epikutikulare Wachse und ihre Zusammensetzung finden sich bei Jeffree (2006).

Als Abschlusschicht stellt die Kutikula zusammen mit den Wachsen eine komplexe Grenzschicht zur Umgebung dar und übernimmt für die Pflanze eine Vielzahl lebenswichtiger Funktionen (Bargel *et al.*, 2006). Eine gute Übersicht über die Arbeiten zu dem Thema „Kutikula“ findet sich bei (Kerstins, 1996).

Die Abschlusschicht reguliert die Wasseraufnahme und den Wasserverlust (Riederer & Schreiber, 1995, 2001; Schönherr, 1982; Schreiber, 2006), den Gasaustausch (Boyer *et al.*, 1997; Langowski, 2002) und den Strahlungshaushalt der Pflanzen (Pfündel *et al.*, 2006). Um das innere Milieu vor unerwünschten Konzentrationsschwankungen zu schützen, muss die Kutikula ebenfalls den Verlust (Leaching) und die Aufnahme von Ionen und gelösten polaren Substanzen kontrollieren (Schreiber, 2006; Tukey, 1970). Zudem hat die Grenzfläche stabilisierende Eigenschaften (Wiedemann & Neinhuis, 1998) und sie stellt eine physikalische Barriere für Pathogene dar (Carver & Gurr, 2006; Juniper & Cox, 1973; Leveau, 2006).

Im Zusammenhang mit der Funktion der Kutikula als Barriere für Wasser entwickelten einige pflanzliche Oberflächen eine extreme Unbenetzbarkeit. Wasser perlt von diesen Oberflächen vollständig ab. Mit dieser **extremen Unbenetzbarkeit** (Superhydrophobie) und einer damit verbundenen weiteren Funktion, der **Selbstreinigung**, beschäftigt sich diese Arbeit. Da diese Eigenschaften allein auf der Struktur der Oberfläche und der Hydrophobie der Wachse beruhen, lassen sie sich auch in die Technik übertragen. Solche biologisch inspirierten Oberflächen spielen inzwischen bei vielen Anwendungen eine wichtige Rolle und führten zu einem starken Anstieg der Erforschung superhydrophober Oberflächen in den Materialwissenschaften.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das große Interesse an superhydrophoben, selbstreinigenden Oberflächen in der Technik spiegelt sich wider in einer starken Zunahme an Publikationen in diesem Bereich. Neueste Erkenntnisse erweitern das Wissen um die physikalischen Zusammenhänge zwischen Benetzung und Struktur. Standen anfänglich hauptsächlich geometrisch strukturierte Oberflächen bei der Erforschung im Vordergrund, wenden sich immer mehr Physiker und Materialwissenschaftler wieder den optimierten biologischen Oberflächen zu. Eine umfassende Zusammenstellung der Erkenntnisse zur Superhydrophobie und Selbstreinigung, sowohl aus dem Bereich der Biologie und der Technik, ist bislang in der Literatur noch nicht vorhanden. Obwohl in einer Dissertation eher unüblich, eigneten sich die, zu diesem Themenkomplex recherchierten, Publikationen zu einer Review-artigen Präsentation des aktuellen Erkenntnisstands. **Die Darstellung des aktuellen Stands des Wissens zu superhydrophoben und selbstreinigenden Oberflächen stellt deshalb das erste Ziel dieser Arbeit dar.**

Bei vielen Pflanzen mit superhydrophoben Blättern kann Pilzbefall beobachtet werden. In der vorliegenden Arbeit wird die Diskrepanz zwischen der bislang vermuteten Effizienz in der Pathogenabwehr und dem Pilzbefall superhydrophober Pflanzen untersucht. Zudem soll geklärt werden, inwieweit Superhydrophobie und Selbstreinigung auch einen Schutz gegenüber Besiedlung von Baustoffen mit Mikroorganismen darstellen.

Ein weiteres Ziel ist deshalb die Überprüfung, in wieweit superhydrophobe selbstreinigende biologische und technische Oberflächen einen wirksamen Schutz vor Mikroorganismen darstellen.

Die Überführung der Benetzung vom Cassie- in den Wenzel-Zustand stellt bei superhydrophoben Oberflächen einen der wichtigsten Vorgänge dar, der in den letzten Jahren intensiv analysiert wurde. Der Verlust der antiadhäsiven Eigenschaften im Wenzel-Zustand hat große Auswirkungen auf die Einsatzgebiete und Anwendungen superhydrophober Oberflächen. Eine Überprüfung, in wieweit bei pflanzlichen Oberflächen diese Transformation stattfindet, ist bislang fast vollständig ausgeblieben, obwohl vermutet wird, dass bei einigen biologischen Vorbildern besonders der Cassie-Zustand energetisch bevorzugt wird.

Das dritte Ziel der Arbeit ist deshalb die Feststellung, ob Kondensation die Funktionalität superhydrophober selbstreinigender Oberflächen außer Kraft setzt.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf, in sich geschlossene Teile. Im **Kapitel 3** werden die Grundlagen der Benetzung superhydrophober und selbstreinigender Oberflächen dargestellt. Dazu gehört auch eine bislang einmalige Übersicht über die Erkenntnisse zu diesen Oberflächen der letzten Jahre.

In den **Kapiteln 4 und 5** wird der Frage nachgegangen, wie bei Wirt-Pathogen-Beziehungen die Etablierung von Pilzen auf superhydrophoben Oberflächen gelingen kann und welche Rolle dabei die Niederschläge spielen.

Im **Kapitel 6** stehen die technischen Oberflächen im Vordergrund. Im Rahmen eines Tests mit simulierten Freilandbedingungen werden selbstreinigende und konventionelle Oberflächen unter hohem Besiedlungsdruck mit aero-terrestrischen Algen miteinander verglichen. Die Effektivität der Selbstreinigung als Schutz gegen Algenbesiedlung wird diskutiert.

Kapitel 7 beschäftigt sich mit der Frage nach dem Einfluss der Kondensation auf die Unbenetzbarkeit. Anhand von pflanzlichen und technischen superhydrophoben Oberflächen wird die Auswirkung der Kondensation auf den Kontakt- und Abrollwinkel behandelt. Vor dem Hintergrund der Ergebnisse werden Rückschlüsse für zukünftige Anwendungen der Superhydrophobie gezogen.

2. Material und Methoden – Allgemeiner Überblick

2.1 Material

Blütenpflanzen

Einen Überblick über das verwendete Pflanzenmaterial gibt Tab. 2.1. Fast alle Pflanzen, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, stammen aus den Botanischen Gärten Bonn. Eine Ausnahme bildeten drei Weizensorten, die vom Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, Bereich Phytomedizin der Universität Bonn zur Verfügung gestellt wurden.

Tab. 2.1: Verwendete Blütenpflanzen

Taxon	Familie	Akzessions-Nr. Bot. Gärt., Bonn
<i>Alocasia macrorrhiza</i> (L.) G. Don.	Araceae	1194
<i>Alstroemeria aurantiaca</i> D. Don	Alstroemeriaceae	2832
<i>Apocynum cannabinum</i> L.	Apocynaceae	3920
<i>Argemone mexicana</i> L.	Papaveraceae	3318
<i>Brassica oleracea</i> . convar. <i>acephala</i> Alef. var. <i>gongylodes</i> L.	Brassicaceae	*
<i>Cercidiphyllum japonicum</i> Siebold & Zucc.	Cercidiphyllaceae	12437
<i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott.	Araceae	4067
<i>Halimodendron halodendron</i> (L.) Schott.	Fabaceae	3141
<i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn.	Nelumbonaceae	19436
<i>Silene vulgaris</i> Garcke.	Caryophyllaceae	6959
<i>Thalictrum flavum</i> ssp. <i>glaucum</i> Cav.	Ranunculaceae	2700
<i>Triticum aestivum</i> Sorte „Kanzler“ L.	Poaceae	*
<i>Triticum aestivum</i> Sorte „Kris“ L.	Poaceae	*
<i>Triticum aestivum</i> Sorte „Ludwig“ L.	Poaceae	*
<i>Tropaeolum majus</i> L.	Tropaeolaceae	3796
<i>Xanthosoma robustum</i> Schott.	Araceae	1070

* Pflanzen, die speziell für die Untersuchungen herangezogen wurden

Algen

Für die Versuche im Kap. 6 wurden im Freiland entnommene, nachbestimmte Algenisolate verwendet (Tab. 2.2). Die Bestimmung erfolgte durch Dr. Gijsbert Lokhorst, Nationalherbarium der Niederlande, Leiden (NL). Darüber hinaus waren an den

Algenbestimmungen Dr. Georg Gärtner von der Universität Innsbruck sowie Prof. Dr. Thomas Friedl von der Universität Göttingen beteiligt.

Tab. 2.2: Verwendete Algen

Taxon	Familie
<i>Klebsormidium flaccidum</i> (Kützing) Silva, Mattox & Blackwell	Klebsormidiaceae
<i>Stichococcus bacillaris</i> (Nägeli)	Klebsormidiaceae
<i>Tetracystis</i> spec.	Chlorophyceae
<i>Chlorococcum</i> spec.	Chlorococcaceae

Pilze

Für die Experimente in den Kap. 4 und 5 wurden unterschiedliche Pilze verwendet. Zur Inokulation von *Triticum aestivum* (vgl. Kap. 4) wurde auf *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* (Erysiphaceae Tul. & C. Tul), den Verursacher von Weizenmehltau, zurückgegriffen. *B. graminis* wurde vom Institut für Pflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (Bereich Phytomedizin) in Bonn zur Verfügung gestellt, wo er auf Weizenpflanzen kultiviert wird.

Bei den Experimenten zum Befall von *N. nucifera* (vgl. Kap. 5) handelte es sich um einen Pilz, der im Freiland die Pflanzen befällt. Ein spezielles Inokulum war deshalb nicht erforderlich. Der Pilz wurde von Prof. Dr. Uwe Braun von der Martin-Luther-Universität in Halle als *Oidium* spec. (Erysiphaceae) bestimmt.

Technische Oberflächen

Zur Untersuchung der Besiedelung von Baustoffen (Kap. 6) ebenso, wie für Experimente zur Kondensation auf superhydrophoben Oberflächen (Kap. 7), wurden unterschiedliche technische Oberflächen verwendet (Tab. 2.3). Dabei handelte es sich sowohl um konventionelle Baustoffe mit herkömmlichen Oberflächen, wie auch um Baustoffe mit funktionalen Eigenschaften. Den größten Teil der technischen Oberflächen bildeten Fassadenfarben und Dachziegel. In zwei Fällen handelte es sich bei den Proben um noch nicht im Markt erhältliche Prototypen, die aus Geheimhaltungsgründen nicht näher beschrieben werden können. Eine Probe (Filterpapier) gehört nicht in die Gruppe der Baustoffe und wurde als Kontrolle des Wachstums der Algen verwendet. Darüber hinaus wurden für die Untersuchungen zur Kondensation (Kap. 7) zwei Metallfolien und zwei Sprays verwendet.

Tab. 2.3: Verwendete technische Oberflächen

Probe	Hersteller	Besonderheit
Handelsübliche Dispersionsfarbe	Sto AG, Stühlingen	
Handelsübliche Silikatfarbe	Sto AG, Stühlingen	
Handelsübliche Silikonharzfarbe	Sto AG, Stühlingen	
Fassadenfarbe „Lotusan®“	Sto AG, Stühlingen	Selbstreinigend
Tondachziegel (schwarz)	Erlus AG, Neufahrn	
Tondachziegel (rot)	Erlus AG, Neufahrn	
Funktionaler Dachziegel (rot)	Erlus AG, Neufahrn	Selbstreinigend
Filterpapier (Nr. 520)	Schleicher & Schüll, Dassel	
Kupferfolie	Circuit Foil Luxemburg, Wiltz (L)	Galvanisch mikrostrukturierte Cu-Oberfläche; CF 35µm NT-TO, nachträglich hydrophobiert
Kupferfolie	Bolta-Werke GmbH, Gottmadingen	Mikrostrukturierte Cu-Oberfläche mit CuO Kristallen; Bolta 18µm BO, Ra = 2,4-2,8 µm, nachträglich hydrophobiert
Mincor®-Spray	BASF Future Business GmbH, Ludwigshafen	Spray zur Erzeugung selbstreinigender Oberflächen
Creavis-Spray (VP LE 8241)	Creavis Gesellschaft für Technologie und Innovation mbH	Spray zur Erzeugung selbstreinigender Oberflächen

2.2 Methoden

Rasterelektronenmikroskopie

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurde sowohl zur Dokumentation als auch zur Analyse des Befalls von pflanzlichen Oberflächen mit Pilzen sowie zur Feststellung der Effizienz der selbstreinigenden Eigenschaften von Oberflächen eingesetzt. Im Folgenden werden die generellen Arbeitsschritte erklärt, die bei der Probenpräparation durchgeführt wurden, sowie die Parameter, welche bei der Rasterelektronenmikroskopie eingestellt wurden. Falls bei den einzelnen Versuchen Abweichungen in der Präparation oder Behandlung der Proben erfolgt sind, wird darauf in den einzelnen Kapiteln gesondert hingewiesen. Bei dem eingesetzten REM handelte es sich um das Modell LEO 1450 (Zeiss AG, ehemals LEO Elektronenmikroskopie GmbH). Die Betrachtung erfolgte bei einer Beschleunigungsspannung von 15 kV und einem Arbeitsabstand von 9-10 mm.

Pflanzliche Oberflächen

Für die Dokumentation der Pflanzenoberflächen im REM wurde das frische Material ohne Verwendung von Fixiermitteln nach der Glycerin-Methode von Ensikat & Barthlott (1993) behandelt. Durch die Glycerinsubstitution wurde ein Schrumpfen der Oberfläche durch Austrocknung vermieden. Das auf diese Weise vorbereitete Pflanzenmaterial wurde mit doppelseitigem Klebeband (Tesa Fix Doppelband, Tesa, Hamburg) auf Aluminium-Probeteller (Plano GmbH, Wetzlar) geklebt und mit Leitkohle (Leit-C nach Göcke, Plano GmbH, Wetzlar) mit dem Tellerrand verbunden.

Um die Ableitung der Elektronen weiter zu verbessern, wurden die Probeteller im Sputtergerät (Balzers SCD 040, Balzers Union, Wiesbaden) mit einer Goldschicht überzogen. Die Beschichtung erfolgte für 30 Sek. bei einer Sputterspannung von 65 mA.

Technische Oberflächen

Im Gegensatz zu den pflanzlichen Oberflächen war bei keiner der verwendeten technischen Oberflächen eine vorherige Fixierung der Proben erforderlich. Lediglich die Probenzerkleinerung erwies sich in einigen Fällen als sehr schwierig. Bei Dachziegeln wurden kleinere Splitter mit einer Größe von ca. 1 cm² durch das Zertrümmern der Proben erzielt.

Bei den verwendeten Fassadenfarben wurden Probenstücke mittels einer Dekupiersäge erzeugt. Die übrigen Proben konnten mit einer Schere beliebig zugeschnitten werden. Die Sprays wurden direkt auf ein kleines Objektträgerglas aufgesprüht.

Die weitere Probenbehandlung entsprach der der pflanzlichen Oberflächen (s.o.).

Kontaktwinkelmessung

Generell wurden die Kontaktwinkel mit dem Kontaktwinkelmessgerät OCA 30 der Firma DataPhysics Instruments GmbH (Filderstadt) gemessen. Nur bei den Untersuchungen zum Modellsystem Weizen und Mehltau (Kap. 4) wurde auf ein manuelles Goniometer (Krüss GmbH, Typ Nr. G-1, Hamburg) zurückgegriffen.

Von pflanzlichen Oberflächen wurden jeweils ca. 7 mm breite Streifen mit dem Skalpell für die Messungen herauspräpariert. Bei den technischen Oberflächen wurden schmale Probenstücke entweder herausgebrochen oder herausgeschnitten.

Alle Proben wurden mit doppelseitigem Klebeband (Tesa Fix Doppelband, Tesa, Hamburg) auf dem Messtisch des Kontaktwinkelmessgeräts fixiert. Über die integrierte Dosiereinrichtung wurde ein Tropfen Aqua dest. aufgesetzt. Wenn nicht anders

beschrieben wurde dabei ein Volumen von 15 μl appliziert. Die Dosierkanüle (SNS 052/026 \varnothing 0,52 mm) wurde, um ein leichtes Ablösen der Tropfen zu ermöglichen, zuvor hydrophobiert (s.u.).

Die Bestimmung der Grundlinie, ebenso wie die Erkennung der Tropfenkontur erfolgte automatisch. Wurden nach der automatischen Erkennung der Kontaktlinie Abweichungen von der tatsächlichen Kontaktlinie festgestellt, fand nachträglich eine manuelle Korrektur statt. War nach der automatischen Erkennung, beispielsweise aufgrund von Lichtreflexen, eine Abweichung in der Tropfenkontur vorhanden, wurde der Tropfen nicht vermessen. Die Kontaktwinkelbestimmung wurde mit der gerätspezifischen Funktion „Young-Laplace-Fitting“ durchgeführt. Wenn nicht anders beschrieben, wurden aus jeweils mindestens 8 Einzelmessungen an unterschiedlichen Stellen einer Oberfläche das arithmetische Mittel und die Standardabweichung bzw. das Konfidenzintervall errechnet. Alle Messungen fanden bei Raumtemperatur von $21^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ statt.

Hydrophobierung

Eine Hydrophobierung war sowohl bei den beiden Kupferfolien, wie auch der Dosiernadel des KW-Gerätes notwendig. Als Hydrophobierungsmittel wurde der Fluorkunststoff Antispread F 2/50 FK 60 (Fa. Dr. Tillwich, Horb-Ahldorf) verwendet. Die Oberflächen und die Nadel wurden für 10 Sekunden in die Lösung eingetaucht, danach die überschüssige Flüssigkeitsmenge abgetropft und anschließend im Wärmeschrank bei 35°C für 1 Stunde zur Trocknung aufbewahrt.

Statistische Auswertung

Als Methode zur Auswertung der experimentellen Daten kam hauptsächlich die Varianzanalyse zur Anwendung. Vor Durchführung der statistischen Tests wurden die Daten auf Normalverteilung und Varianzhomogenität (Homoskedastizität) geprüft. Die Prüfung auf Normalverteilung erfolgte mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test, die auf Varianzhomogenität mit dem Levene-Test.

Zur Klärung des Einflusses von Faktoren auf abhängige Variablen wurden ein- bzw. zweifaktorielle Varianzanalysen durchgeführt. Anschließend multiple Mittelwertvergleiche wurden mittels Tukey-HSD-Test durchgeführt, in Fällen nicht homogener Varianzen wurde stattdessen der Games-Howell-Test verwendet.

Falls Normalverteilung oder Varianzhomogenität der Daten nicht gegeben war, wurden gängige Datentransformationen (z.B. \log , x^2 , $1/x$) durchgeführt. Wenn durch Datentransformation keine Normalverteilung und/oder Varianzhomogenität erreicht werden konnte, fand bei paarweisen Vergleichen der Mann-Whitney-U-Test Anwendung, bei mehr als zwei Gruppen der nicht parametrische Kruskal-Wallis-Test. Als Post-Hoc-Test im nichtparametrischen Fall wurde auf eine in MS-Excel programmierte Version des Dunn-Tests zurückgegriffen (Copyright: Edwin Martens, Zentrum für Biostatistik, Universität Utrecht).

Sämtliche statistische Auswertungen wurden mit SPSS 12.0 (SPSS Science, Chicago, USA) durchgeführt, die Graphen wurden mit SigmaPlot 9.0 (SPSS Science, Chicago, USA) bzw. mit Microsoft Excel erzeugt.

3. Superhydrophobie und Selbstreinigung: Stand des Wissens

Definition und Terminologie

Das Phänomen der Unbenetzbarkeit von Oberflächen äußert sich durch das vollständige Abperlen von Wassertropfen. Wasser bildet auf unbenetzbaren Oberflächen eine nahezu perfekt sphärische Form und rollt selbst bei kleinsten Neigungswinkeln ab. Bereits früh wurde dieses Phänomen in der Natur beobachtet (s. Kap. Extrem unbenetzbare Oberflächen in der Natur) und Mitte des 20en Jahrhunderts bei Pflanzen (Ziegenspeck, 1942) und Insekten (Crisp & Thorpe, 1948) eingehend untersucht. Zu diesem Zeitpunkt war zur Beschreibung dieser Eigenschaft der Ausdruck „water repellent“ üblich (Cassie & Baxter, 1944). Mitte der 1990er Jahre prägte eine japanische Arbeitsgruppe zur Beschreibung solcher Oberflächen erstmals den Begriff „super-water-repellent“ (Onda *et al.*, 1996; Shibuichi *et al.*, 1996). Wenige Jahre zuvor taucht zudem der Begriff „ultrahydrophobic“ auf, der ebenfalls zur Beschreibung der Unbenetzbarkeit verwendet wird (Ogawa *et al.*, 1993). Eine Abwandlung dieses Begriffs findet sich 1998 in einem Patent (Hirsch, 1998). Der Erfinder verwendet den Begriff „Super hydrophobic“. Seit dem existieren in der Literatur die beiden Begriffe „Ultra hydrophobic“ und „Super hydrophobic“ nebeneinander, zum Teil mit leichten Abwandlungen, wie einem Bindestrich oder zusammengeschrieben. Ein Jahr später versuchten Chen *et al.* (1999) „Ultrahydrophobic“ als Begriff ausschließlich für Oberflächen zu definieren, bei denen Wassertropfen bei kleinsten Neigungswinkeln von den Oberflächen abrollen. Sie stellten fest, dass auf einigen Oberflächen zwar die Tropfen eine Kugelform annehmen können, jedoch nicht unbedingt abrollen müssen, sondern festhaften können. In der Mehrzahl der Publikationen hat sich jedoch der Begriff „Superhydrophobic“ durchgesetzt, obwohl die Forderung von Chen *et al.* (1999) nach der Bestimmung des dynamischen Verhaltens der Wassertropfen berechtigt war. In der Literatur finden sich noch weitere Begriffe wie „extreme water repellent“ (bsp. Jung & Bhushan, 2006), „ultraphobic“ (bsp. Extrand, 2002), „ultralophobic“ (bsp. Extrand, 2004) und „superoleophobicity“ (bsp. Feng & Jiang, 2006), die jedoch stets mit Wasser unbenetzbare Oberflächen beschreiben. Die Verwendung dieser Begriffe ist relativ selten und eher ungewöhnlich. Mit dem Zusatz „oleophob“ oder „lyophob“ wird meist auf den Umstand hingewiesen, dass eine Abweisung von Ölen oder anderen Substanzen ebenfalls gegeben ist. Ein weiterer Umstand macht die Diskussion über die Begriffe noch schwieriger. Mit einer Publikation über die Selbstreinigung superhydrophober pflanzlicher Oberflächen (Barthlott & Neinhuis, 1997) und der

Einführung einer Marke zur Kennzeichnung von entsprechenden bionischen Produkten durch den gleichnamigen Autor ist ein weiterer Begriff geprägt worden, der wie kein anderer inzwischen als ein Synonym für solche Oberflächen in der Literatur verwendet wird: Lotus-Effect® (Cerman *et al.*, 2004). Oft wird diese Marke zur Beschreibung der Oberflächeneigenschaften angewandt (Gao & McCarthy, 2006a; Marmur, 2004), obwohl dieser Begriff ausschließlich zu Kennzeichnung von Produkten eingesetzt werden sollte. In der vorliegenden Arbeit wird im Folgenden deshalb ausschließlich der Begriff „Superhydrophob“ zur Beschreibung der extrem unbenetzbaren Oberflächen verwendet, da dieser auch am weitesten verbreitet ist.

Die Erforschung der superhydrophoben Oberflächen erlebte Ende der 90er Jahre durch die Beschreibung der selbstreinigenden Eigenschaften bei einigen unbenetzbaren pflanzlichen Oberflächen (Barthlott & Neinhuis, 1997) einen starken Aufschwung. Trotz der inzwischen schätzungsweise 400-500 Publikationen zu diesem Thema (in dieser Arbeit bereits 380 Publikationen zusammengetragen) fehlt in der Literatur eine einheitliche Definition der Unbenetzbarkeit. Einige Arbeiten definieren Superhydrophobie allein über einen hohen Kontaktwinkel (vgl. Abb. 3.3) (bsp. Gao & McCarthy, 2006b), andere geben zusätzlich den Abrollwinkel (vgl. Kap. Abrollwinkel auf superhydrophoben Oberflächen) (Feng *et al.*, 2007) oder die Hysterese (vgl. Abb. 3.9) (Quére *et al.*, 2003) mit an. In vielen Fällen unterbleibt jedoch eine Definition (bsp. (Bormashenko *et al.*, 2007; Lau *et al.*, 2003)).

Im Hinblick auf den Kontaktwinkel, der die Grenze zwischen Hydrophobie und Superhydrophobie markiert, herrscht Uneinigkeit. In den meisten Fällen wird ein Wasser-Kontaktwinkel $>150^\circ$ angegeben (bsp. Jiang *et al.*, 2004a). Aber auch KW von $>140^\circ$ (Nun *et al.*, 2002) oder $>160^\circ$ (Parkin & Palgrave, 2004) werden zur Beschreibung der Superhydrophobie verwendet.

Eine effiziente Selbstreinigung von superhydrophoben Oberflächen beginnt ca. ab einem Kontaktwinkel $>140^\circ$ (Barthlott & Neinhuis, 1997) und einem Abrollwinkel $<10^\circ$. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit der Definition der Superhydrophobie von Nun *et al.* (2002) gefolgt, die diese Grenzwerte expliziert festlegten.

Übersichtsarbeiten über superhydrophobe Oberflächen, ihre Eigenschaften, physikalische Grundlagen und ihre Einsatzgebiete finden sich bei Nakajima *et al.* (2001), Feng *et al.* (2002), Blossey (2003), McHale *et al.* (2004b), Nakajima (2004), Zeng *et al.* (2004), Sun *et al.* (2005b), Quére (2005), Callies & Quére (2005), Feng & Jiang (2006) und Li *et al.* (2007).

Physikalische Grundlagen der Benetzung

Die physikalischen Grundlagen der Benetzung gehen auf den Forscher Thomas Young (1773-1829) zurück, der sich mit der Kapillarität von Flüssigkeiten beschäftigte (Young, 1805). Die Kapillarität einer Flüssigkeit hängt von deren Oberflächenspannung ab.

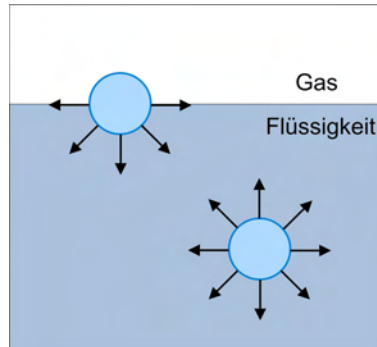


Abb. 3.1: Anziehenden Kräfte, die auf Wassermoleküle (blau) in Abhängigkeit ihrer Lage einwirken.

Die Oberflächenspannung ist das Resultat der Kräfte, die auf ein Molekül an einer Oberfläche wirken. Befindet sich ein Wassermolekül innerhalb des Wassers, wirkt auf dieses von den benachbarten Molekülen eine von allen Seiten gleich anziehende Kraft. Betrachtet man jedoch ein Wassermolekül an der Oberfläche, fehlt diese anziehende Kraft von einer Seite. Das Molekül ist nur den Kräften der seitlichen und nach innen liegenden Molekülen ausgesetzt (Abb. 3.1). Daraus resultiert eine Kraft, die nach innen gerichtet ist und sich als Oberflächenspannung bemerkbar macht. Diese Kraft bewirkt, dass ein Tropfen in Schwerelosigkeit eine runde Form annimmt, da die Oberflächenspannung stets bemüht ist, die Oberfläche zu minimieren. Eine Verkleinerung der Oberfläche ist mit einem Energiegewinn verbunden. Um die runde Tropfenform aufzubrechen ist deshalb Energie notwendig. Die Ober- oder Grenzflächenspannung ist die reversible Arbeit, die aufzuwenden ist, um die Grenzfläche um eine Flächeneinheit (1m^2) zu vergrößern. Bei Benetzung eines Festkörpers (z.B. Glasscheibe) liefert die Festkörperoberfläche die Energie für die Vergrößerung der Wasseroberfläche, wie beispielsweise bei der Benetzung einer Glasscheibe. In diesem Fall liegt der Tropfen halbkugelförmig auf der Oberfläche. Dabei benetzt ein Tropfen eine Oberfläche umso stärker, je größer die zur Verfügung gestellte Energie ist.

Wird ein Flüssigkeitstropfen auf eine Oberfläche appliziert, so können zwei verschiedene Situationen eintreten (Abb. 3.2): 1. Der Tropfen spreitet und bildet einen Film auf der Festkörperoberfläche; 2. Es findet eine partielle Benetzung statt. Bei

partieller Benetzung bildet sich auf der Oberfläche ein Tropfen aus, der durch einen diskreten Kontaktwinkel gekennzeichnet ist.

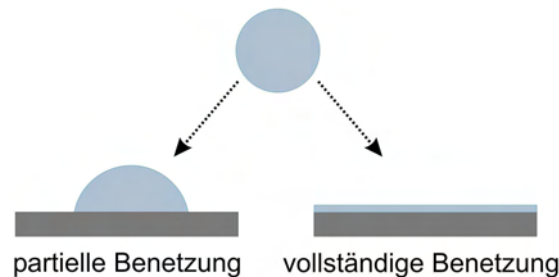


Abb. 3.2: Verhalten von Wasser auf unterschiedlich benetzbaren Oberflächen. (verändert nach de Gennes *et al.*, 2004).

Der Kontaktwinkel entspricht dem Winkel zwischen der Festkörperoberfläche und der Tangente an der Phasengrenze Festkörper/Flüssigkeit/Gas (Abb. 3.3). Dieser Winkel ergibt sich aus den Grenzflächenspannungen zwischen Festkörper/Gas, Festkörper/Flüssigkeit und Flüssigkeit/Gas im Gleichgewichtszustand gemäß der Gleichung nach Thomas Young (1773-1829):

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lg}} \quad \text{Youngs-Gleichung} \quad (1.1)$$

Grenzflächenspannung Festkörper/Gas σ_{sg} , Festkörper/Flüssigkeit σ_{sl} , Flüssigkeit/Gas σ_{lg}

Per Definition kennzeichnet ein Kontaktwinkel $\theta < 90^\circ$ die Oberfläche als hydrophil und ein Kontaktwinkel $\theta > 90^\circ$ die Oberfläche als hydrophob.

Die Kontaktwinkelmessung ist deshalb sehr wichtig, weil eine *direkte* Bestimmung der Oberflächenspannung eines Festkörpers nicht möglich ist. Die Oberflächenspannungen von Gas und Flüssigkeit sind leichter zugänglich, so dass über den Kontaktwinkel θ indirekt die Oberflächenspannung des Festkörpers bestimmt werden kann. Da dieser Begriff für Festkörper jedoch irreführend ist und Oberflächenspannungen auch als „freie Oberflächenenergie“ angesehen werden können, wird im Zusammenhang mit Festkörpern in der Literatur meist dieser Begriff verwendet. Dadurch wird auch verständlich, welche Energie gemeint ist, die dem Tropfen zur Benetzung eines Festkörpers zur Verfügung gestellt wird. Oberflächen mit hoher freier

Oberflächenenergie werden stärker benetzt, als Oberflächen mit geringer freier Oberflächenenergie.

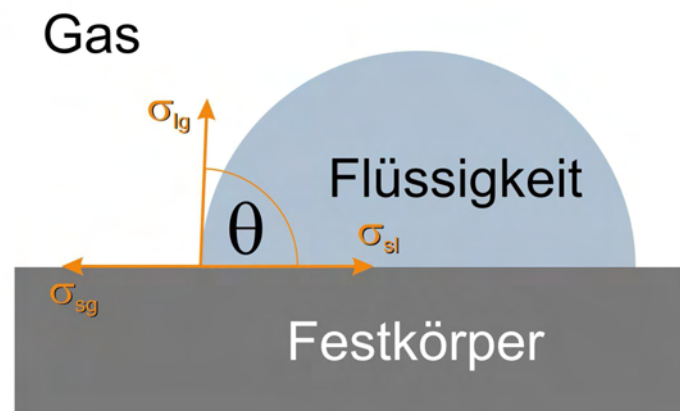


Abb. 3.3: Flüssigkeitstropfen auf einer Festkörperoberfläche: Bestimmung des Kontaktwinkels mittels angelegter Tangente am Dreiphasenpunkt Gas/Flüssigkeit/Festkörper. Grenzflächenspannungen: Flüssigkeit/Gas σ_{lg} ; Festkörper/Flüssigkeit σ_{sl} ; Festkörper/Gas σ_{sg} .

Zur Beschreibung der Benetzbarkeit von Festkörpern wird die kritische Oberflächenspannung σ_c angegeben. Diese wird ermittelt, indem die Kontaktwinkel θ von Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Oberflächenspannungen σ_{lg} gemessen werden. Werden dann in einem sog. ZISMAN Plot (Zisman, 1964) die Kontaktwinkel θ über σ_{lg} aufgetragen und eine Gerade durch die Messwerte gelegt, kann die kritische Oberflächenspannung an dem Punkt abgelesen werden, in dem die Gerade ihren Schnittpunkt mit der Achse $\cos \theta = 1$ hat (Abb. 3.4). Dabei gilt:

$\sigma_{lg} < \sigma_c \Rightarrow$ vollständige Benetzung, Spreitung

$\sigma_{lg} > \sigma_c \Rightarrow$ partielle Benetzung

Hoch reines, glattes Silizium beispielsweise weist eine kritische Oberflächenspannung σ_c von ca. 150 mN/m auf und ist damit von Wasser (73 mN/m) sehr gut benetzbar. Teflon (~ 20 mN/m) wird dagegen von Wasser nur partiell benetzt. Die geringste kritische Oberflächenspannung erreicht eine Schicht aus hexagonal dicht angeordneten CF_3 -Gruppen. In diesem Fall beträgt die Oberflächenspannung 6,7 mN/m und der Kontaktwinkel mit Wasser ca. 120° (Nishino *et al.*, 1999).

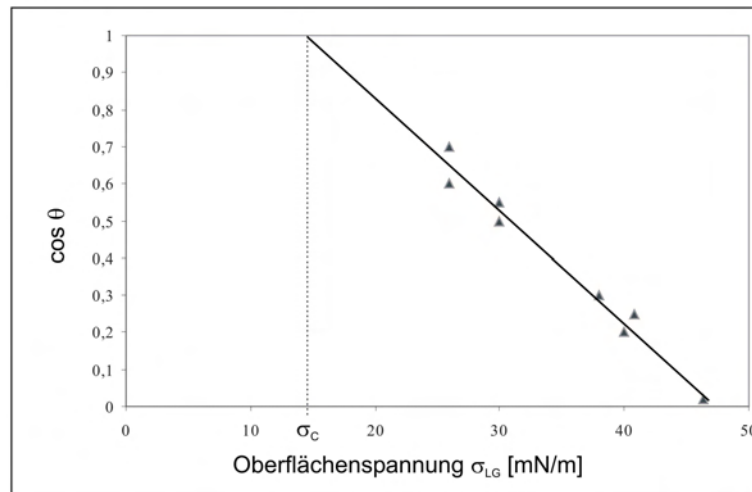


Abb. 3.4: ZISMAN's Plot zur Ermittlung der kritischen Oberflächenspannung (σ_c) einer Oberfläche mit Hilfe von Flüssigkeiten unterschiedlicher Oberflächenspannungen (verändert nach Zisman, 1964).

Benetzung strukturierter hydrophober Oberflächen

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich ausschließlich auf glatte Oberflächen. Um bei Benetzung mit Wasser noch höhere Kontaktwinkel (KW) als 120° zu erreichen, muss eine Oberfläche entweder rau oder chemisch heterogen aufgebaut sein. Wenzel (1936) war der erste, der den Einfluss von Rauigkeit auf den Kontaktwinkel zu erklären versuchte. Ausgehend von der Youngs-Gleichung (1.1) und unter der Annahme, dass die Oberfläche chemisch homogen und die Rauigkeit viel kleiner als der Tropfen selbst ist, ergibt sich nach Wenzel folgende Beziehung zwischen dem makroskopisch messbaren und dem Youngs-Kontaktwinkel auf der chemisch homogenen, aber glatten Oberfläche:

$$\cos \theta_m = r \cos \theta \quad \text{Wenzel-Gleichung} \quad (1.2)$$

Youngs-Kontaktwinkel: θ ; Makroskopisch messbarer Kontaktwinkel: (θ_m); Rauigkeit: r

Dabei ist r definiert als das Verhältnis zwischen der tatsächlichen und der projizierten Oberfläche. Zusammenfassend drückt die Gleichung von Wenzel eine generelle Verstärkung der Benetzungseigenschaften aus. Eine hydrophile glatte Oberfläche weist bei zusätzlicher Rauigkeit einen noch kleineren KW auf. Entgegengesetzt nimmt der KW einer hydrophoben Oberfläche bei Aufrauung zu. Die Gleichung von Wenzel ist jedoch nicht auf alle rauen Oberflächen anzuwenden. Ist eine Rauigkeit gegeben, die der Wassertropfen nicht mehr „nachzeichnen“ kann, können luftgefüllte Zwischenräume entstehen. Dies gilt besonders für hydrophobe Oberflächen ($\theta > 90^\circ$ oder $\sigma_{sg} < \sigma_{sl}$).

Speziell für solche Oberflächen entwickelten Cassie & Baxter (1944) eine weitere Gleichung. Sie gingen davon aus, dass der Kontaktwinkel von dem Verhältnis zwischen tatsächlich benetzter Oberfläche und makroskopischer Gesamtfläche abhängt:

$$\cos \theta_m = r' \cos \theta - \Phi_{lg}$$

Cassie & Baxter-Gleichung (1.3)

Verhältnis zwischen tatsächlich benetzter Oberfläche und makroskopischer Gesamtfläche: r'
 Anteil der makroskopischen Gesamtfläche bezogen auf die Flüssigkeit/Gas-Grenzfläche: Φ_{lg}
 Makroskopisch messbarer Kontaktwinkel: θ_m ; Young-Kontaktwinkel: θ

Der damalige Wissensstand wurde von Adam (1963) auch unter Berücksichtigung biologischer Oberflächen zusammengefasst. Die ersten, die den Einfluss der Struktur auf die Unbenetzbarkeit untersuchten, indem sie die Rauigkeit der Oberfläche direkt vermaßen und ihre Daten an Modellen prüften, waren Forscher der Kao Corporation aus Japan (Onda *et al.*, 1996; Shibuichi *et al.*, 1996; Shibuichi *et al.*, 1998). Sie gingen von fraktal strukturierten Oberflächen aus und zeigten basierend auf der Gleichung von Wenzel (Gl. 1.2) den Einfluss der Rauigkeit (fraktalen Dimension) auf den makroskopischen Kontaktwinkel. Ihre Daten überprüften sie anhand einer Alkylketendimer (AKD) Oberfläche, indem sie die fraktale Dimension an Querschnitten der Oberfläche bestimmten und den KW maßen. Auf der von ihnen erzeugten Oberfläche wurde ein KW von 174° (~ 2 mm \varnothing Tropfen) ermittelt, der gut mit dem berechneten Wert übereinstimmte.

Bico *et al.* (1999) ermittelten den KW einer strukturierten Oberfläche, die aus regelmäßig verteilten, gleichförmigen, mikroskopischen Prismen bestand. In diesem Fall ergab sich nach der Gleichung (1.3):

$$\cos \theta_m = -1 + \Phi_s (\cos \theta + 1)$$

(1.4)

$$\Phi_s = 1 - \Phi_{lg}$$

Makroskopisch messbarer Kontaktwinkel: θ_m ; Young-Kontaktwinkel: θ ; Benetzter Feststoffanteil: Φ_s ;
 Anteil der makroskopischen Gesamtfläche bezogen auf die Flüssigkeit/Gas-Grenzfläche: Φ_{lg}

Je geringer der benetzte Feststoffanteil wird, desto höher ist der KW. Im Grenzfall $\Phi_s = 0$ beträgt demnach der KW 180° . Ob Luft in Zwischenräumen eingeschlossen wird oder

nicht, hängt folglich von der Geometrie der Rauigkeiten und dem mikroskopischen KW ab. Oberflächen, die aufgrund von Rauigkeiten Luft in den Zwischenräumen einschließen, werden auch Kompositoberflächen genannt, da die Oberflächen aus Luft und Feststoff zusammengesetzt sind. de Gennes *et al.* (2004) beschrieben die Bedingungen, die notwendig sind, damit bei einer Oberfläche Luft eingeschlossen wird. Angenommen wurden zwei Oberflächen, deren Strukturen durch Sinuskurven gleicher Wellenlänge gekennzeichnet sind, die sich jedoch in der Amplitude unterscheiden (Abb. 3.5 u. 3.6). Bei geringen KW kann das Wasser die Zwischenräume füllen. Übersteigt jedoch die Amplitude eine bestimmte Höhe, wird zwangsläufig Luft eingeschlossen.

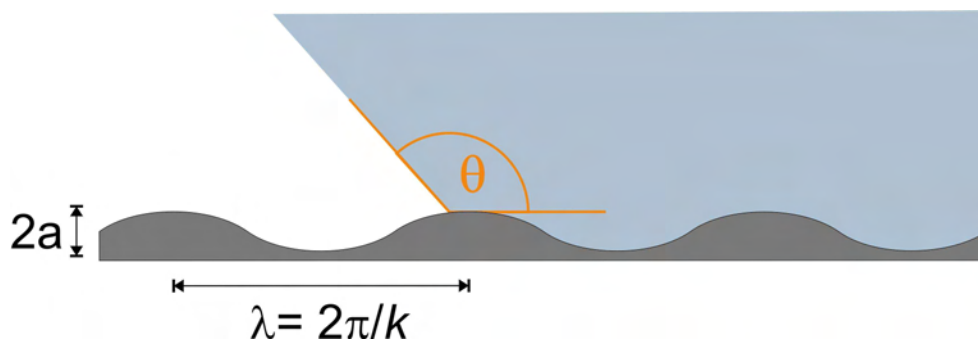


Abb. 3.5: Ideale Festkörperoberfläche mit einem Sinusprofil. Bei geringen Amplituden folgt die Flüssigkeit den Wellen. a : Amplitude; λ : Wellenlänge; k : Faktor (verändert nach de Gennes *et al.*, 2004).

Als Kriterium für Lufteinschlüsse bei einem gegebenen KW θ gilt dann:

$$a > \frac{\lambda \tan \theta}{2\pi} \quad (1.5)$$

Amplitude: a ; Wellenlänge: λ ; Kontaktwinkel: θ

Beträgt der mikroskopische KW nach der Gleichung von Young (Gl. 1.1) etwas mehr als 90° , wird deutlich, warum bei höherer Rauigkeit (Amplitude) der Einschluss von Luft möglich wird. Der maximal erreichbare KW (= dem KW auf der chemisch gleichen aber glatten Oberfläche) bildet sich an den einzelnen Strukturerehebungen aus (mikroskopischer KW). Damit wird ein weiteres Eindringen des Wassers verhindert. Für $\theta = 120^\circ$ und bei einer Wellenlänge $\lambda = 4 \mu\text{m}$ werden Lufteinschlüsse etwa ab einer Amplitude von $1 \mu\text{m}$ möglich. In Abb. 3.6 sind die Lufteinschlüsse für zwei

mikroskopische KW wiedergegeben. Je höher der KW, desto geringer ist die Eindringtiefe des Wassers zwischen die Strukturen.

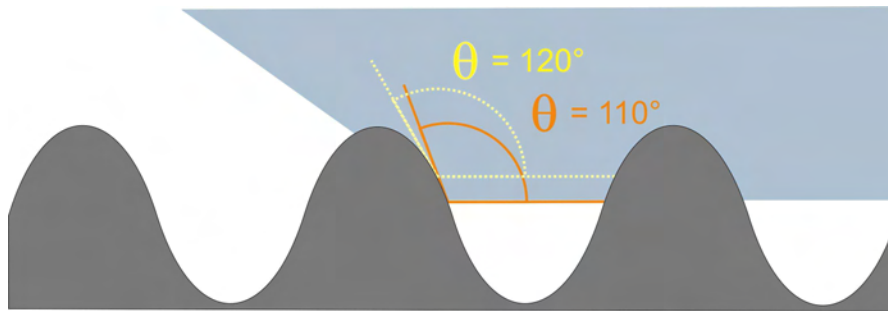


Abb. 3.6: Ideale Festkörperoberfläche mit Sinusprofil. Eindringtiefe von Wasser bei zwei unterschiedlichen Youngs-KW. (verändert nach de Gennes *et al.*, 2004).

Auch bei mikroskopischen KW unter 90° sind Lufteinschlüsse möglich (Herminghaus, 2000). Als Voraussetzung dafür müssen die Strukturen Hinterschneidungen aufweisen (Abb. 3.7). Die Benetzung der Strukturen erfolgt bis zu dem Punkt, an dem der Young-KW erreicht wird. Im vorliegenden Fall beträgt der Kontaktwinkel ca. 70° .

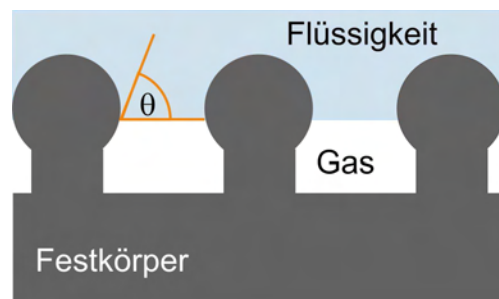


Abb. 3.7: Benetzung einer strukturierten Oberfläche mit Hinterschneidungen (verändert nach Herminghaus, 2000).

Die Theorie von Herminghaus (2000), dass selbst mit einem hydrophilen Material Superhydrophobie erreicht werden kann, haben Xiao *et al.* (2006) und Cao *et al.* (2007) experimentell nachgewiesen. Die Unbenetzbarkeit einer Oberfläche wird zudem durch selbstähnliche Strukturen (gleiche, sich wiederholende Strukturen in unterschiedlichen Dimensionen) weiter erhöht. Wie in Abb. 3.8 zu sehen, werden jeweils die mikroskopischen KW an den einzelnen Strukturelementen erreicht. Dies führt bei mehrfach hierarchisch strukturierten Oberflächen zu größeren Bereichen, die nicht benetzt werden (Herminghaus, 2000).

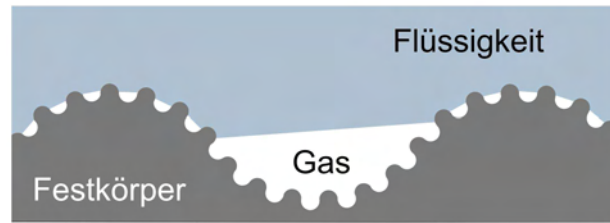


Abb. 3.8: Benetzung einer hierarchisch aufgebauten, selbstähnlich strukturierten Oberfläche (verändert nach Herminghaus, 2000).

Die Arbeiten von Wenzel (1936) und Cassie & Baxter (1944) zur Benetzung von strukturierten Oberflächen haben bis heute nichts an ihrer Aktualität verloren. Eine energetische Betrachtung ihrer Ergebnisse wird von Swain & Lipowsky (1998) vorgenommen. In dieser Arbeit beziehen sie erstmals auch die Gravitation und die Kontaktlinie (s. weiter unten) mit ein.

Dynamisches Verhalten von Tropfen auf superhydrophoben Oberflächen

Um das Verhalten von Flüssigkeiten auf Oberflächen zu beschreiben, reicht der KW alleine nicht aus (Quéré, 2002a). Er besagt lediglich, wie sich die Flüssigkeit im Gleichgewichtszustand auf einer Oberfläche verhält. In den meisten Fällen liegen Tropfen jedoch nicht ruhig auf Oberflächen, sondern befinden sich in Bewegung, wie beispielsweise Regentropfen, die eine Scheibe herunterlaufen. Dabei wird ständig an der einen Seite des Tropfens neue, zuvor trockene Oberfläche benetzt. An der Rückseite zieht sich der Tropfen von bereits benetzten Flächen zurück; die als Fort- und Rückschreitwinkel bezeichneten Kontaktwinkel entstehen. In der Regel ist der Fortschreitwinkel (θ_F) größer als der KW eines ruhenden Tropfens und der Rückschreitwinkel (θ_R) kleiner (Abb. 3.9).

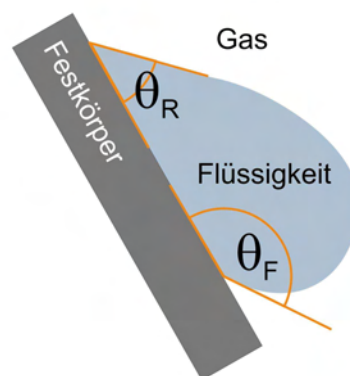


Abb. 3.9: Fortschreitwinkel θ_F und Rückschreitwinkel θ_R eines Tropfens auf einer geneigten Oberfläche.

Der Unterschied zwischen θ_F und θ_R wird Hysterese des KWs genannt (de Gennes, 1985). Die Bestimmung dieser beiden Winkel ist schwieriger als die des KWs. Dabei werden hauptsächlich zwei Methoden eingesetzt. Zu einem kann man das Tropfenvolumen kontinuierlich vergrößern und dabei fortwährend den Fortschrittswinkel messen. Anschließend wird das Tropfenvolumen wieder verkleinert und der Rückschrittswinkel gemessen. Die andere Möglichkeit besteht darin, die Oberfläche nach dem Absetzen des Tropfens kontinuierlich zu neigen, bis der Tropfen zu rutschen beginnt. Zwischen dem Neigungswinkel der Oberfläche im Moment des Rutschens und der Hysterese besteht der folgende Zusammenhang (Öner & McCarthy, 2000):

$$\sin \alpha = \frac{\sigma_{sl} \omega (\cos \theta_R - \cos \theta_F)}{m g} \quad (1.6)$$

Grenzflächenspannung Festkörper/Flüssigkeit: σ_{sl} ; Neigungswinkel der Oberfläche: α ; Masse des Tropfens: m ; Breite senkrecht zur Bewegungsrichtung: ω ; Fortschrittswinkel: θ_F ; Rückschrittswinkel: θ_R

Generell gilt, dass bei geringerer Hysterese die Oberfläche weniger geneigt werden muss, damit sich der Tropfen in Bewegung setzt.

Raue Oberflächen, bei denen gemäß (Cassie & Baxter, 1944) Luft zwischen den Strukturen eingeschlossen ist, weisen eine geringe Hysterese auf. Auf solchen Oberflächen ist das Verhalten von Tropfen sehr komplex (Richard & Quéré, 1999).

Bereits in den 60er Jahren untersuchten Dettre & Johnson (1964) die Hysterese von Wasser auf Oberflächen mit fluorierten Wachsen, deren Rauigkeit mit der Anzahl von Wärmebehandlungen abnahm. Sie konnten zeigen, dass Fortschritt- und Rückschrittswinkel schlagartig größer werden, wenn es zur Benetzung der Strukturzwischenräume durch die Abnahme der Rauigkeit kommt (Abb. 3.10). Dabei maßen sie den Parameter Rauigkeit allerdings nicht direkt, so dass nur eine qualitative Aussage über den Umschlagspunkt möglich war. Die theoretische Auswirkung der Rauigkeit auf die Hysterese diskutierten die Autoren an einer idealisierten sinusoidalen Oberfläche (Johnson & Dettre, 1964).

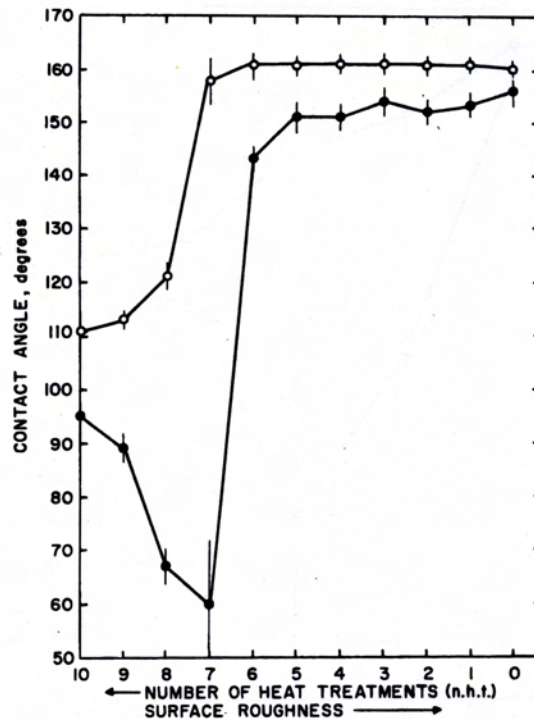


Figure 1. Water contact angles on TFE-methanol telomer wax surface as a function of roughness

○ Advancing angle
● Receding angle

Abb. 3.10: Untersuchungen zum Einfluss von Wärmebehandlungen auf den Fortschritt- und Rückschreitwinkel einer wachststrukturierten Oberfläche (aus Dettre & Johnson, 1964)

Chen *et al.* (1999) beschreiben Oberflächen mit Kontaktwinkeln zwischen 140° und 174° , die ein stark unterschiedliches Ablaufverhalten der Tropfen aufweisen. Zur Beschreibung der Hydrophobie einer Oberfläche schlagen die Forscher deshalb vor, nicht nur den Kontaktwinkel anzugeben, sondern als entscheidenden Parameter auch die Hysterese zu messen. Zu dieser Erkenntnis gelangten sie zunächst über ein einfaches Gedankenexperiment, bei dem sie ausgehend von der Cassie & Baxter-Gleichung (1.3) unterschiedliche Strukturgeometrien gleichen Feststoffanteils betrachteten und für diese Oberflächen die Energiebarrieren für die Kontaktlinien (Wasser/Festkörper) diskutierten. Ausgehend von den Kontaktwinkeln berechnet nach Cassie & Baxter (1944) für eine PTFE/Luft-Kompositoberfläche ergibt sich für einen Feststoffanteil von 1% ein Kontaktwinkel von 173° . Besteht die Oberflächenstruktur in diesem Fall aus einem Gitter, so wird die Kontaktlinie des Tropfens aus energetischen Gründen bestrebt sein den Gitterstrukturen zu folgen. Dadurch wird die Kontaktfläche zur Luft minimal (Abb. 3.11a).

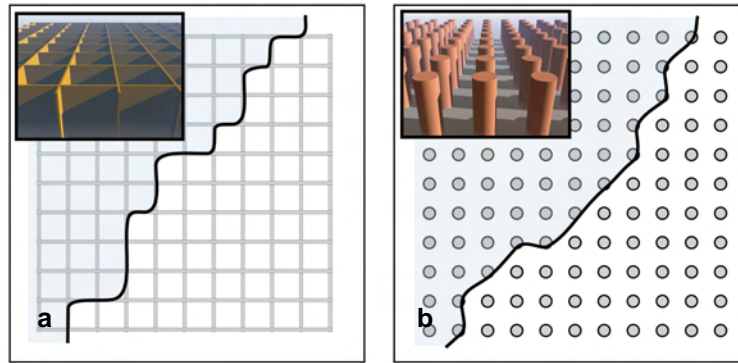


Abb. 3.11: Mögliche Kontaktlinien zwischen Wasser und Festkörper auf zwei unterschiedlich strukturierten Oberflächen mit dem gleichen Feststoffanteil. a: Gitter; b: Zylinder (verändert nach Öner & McCarthy, 2000).

Wird auf einer solchen Oberfläche das Tropfenvolumen vergrößert, liegt der Fortschrittswinkel zunächst nahe 180° , bevor die Kontaktlinie zum nächsten metastabilen Zustand weiter verschoben wird. Umgekehrt verhält es sich bei der Ermittlung des Rückschreitwinkels. Wird das Tropfenvolumen verkleinert, bleibt auf dieser Oberfläche zunächst die Kontaktlinie haften, bis der gleiche oder sogar ein kleinerer Winkel erreicht wird, als auf einer glatten PTFE Oberfläche. Die Energiebarrieren zum Verschieben der Kontaktlinie auf einer solchen Oberfläche hängen von der Maschenweite des Gitters ab und sind verhältnismäßig hoch. Die Hysterese ist in diesem Fall groß.

Abb. 3.11b zeigt ebenfalls eine Oberfläche mit einem PTFE-Feststoffanteil von 1%, jedoch bestehen die Strukturen aus einzelnen Stäbchen, die eng genug zusammenstehen, damit das Wasser nicht in die Zwischenräume einsinkt. Auf einer solchen Oberfläche ist die Kontaktlinie extrem instabil, da kaum energetische Unterschiede zwischen den verschiedenen Kontaktkonfigurationen bestehen. Man spricht auch von Kontaktliniendiskontinuität. In einem solchen Fall wird die Kontaktlinie sehr leicht über die einzelnen Stäbchen verschoben und die Hysterese bleibt extrem klein. Für Oberflächen, die eine sehr geringe Hysterese zeigen, schlagen Chen *et al.* (1999) den Begriff „ultrahydrophobic“ oder „ultraliphobic“ vor. Zudem zeigen sie, dass auch glatte Oberflächen eine geringe Hysterese besitzen können. Die gemessenen Fortschritt- und Rückschreitwinkel betragen bei einer glatten Oberfläche 106° bzw. 105° . Diese geringe Hysterese wurde damit erklärt, dass sich die Beschichtung ähnlich wie eine „Flüssigkeit“ verhielt. In diesem Fall bestehen beim Verschieben der Kontaktlinie auf der Oberfläche ebenfalls nur geringe Energiebarrieren.

Öner & McCarthy (2000) weisen in einer Untersuchung mit zahlreichen unterschiedlich strukturierten Oberflächen auf die Bedeutung der Dreiphasenkontaktlinie für das Abrollverhalten von Wasser hin. Die Dreiphasenkontaktlinie (Festkörper/Flüssigkeit/Gas) besitzt eine Struktur, die durch Form, Länge, Kontaktkontinuität und Anzahl der Kontakte bestimmt wird. Eine Änderung dieser Parameter wirkt sich auf das Verhalten der Tropfen auf diesen Oberflächen aus (Yoshimitsu *et al.*, 2002). Damit ein Wassertropfen von einer Oberfläche leicht abrollt, ist eine Destabilisierung der Dreiphasenkontaktlinie notwendig. Öner & McCarthy (2000) bestimmten die dynamische Hydrophobie einer Oberfläche über die Messung von Fort- und Rückschreitwinkeln auf photolithographisch strukturierten Siliziumoberflächen, die mit Hydrocarbonen, Siloxanen und Fluorocarbonen hydrophobiert wurden. Die Strukturen bestanden aus rechteckigen Säulen, deren Abstände je nach Oberfläche 2, 8, 16, 32, 64 oder 128 μm betragen und eine Höhe von 20, 40, 60, 80, 100 oder 140 μm aufwiesen. Die Oberflächen mit Strukturabständen von 2-32 μm zeigten hohe Kontaktwinkel mit einer geringen Hysterese und damit Superhydrophobie. Bei den Oberflächen mit einem Strukturabstand $>32 \mu\text{m}$ gelangte das Wasser offenbar in die Zwischenräume der Strukturen, wodurch die Hysterese erhöht wurde. Dies führen die Autoren auf die Änderung der Dreiphasenkontaktlinie zurück. Einen Einfluss der Chemie (verschiedene Hydrophobierungen) konnten sie nicht nachweisen. Als weiteres Ergebnis ihrer Arbeit zeigte sich, dass die Höhe der Strukturen sich nicht auf Fort- und Rückschreitwinkel auswirkt.

Während Öner & McCarthy (2000) als wichtiges Kriterium für extreme Unbenetzbarkeit die Abstände der Strukturen und die Destabilisierung der Dreiphasenkontaktlinie angeben, führt Extrand (2002) an den von Öner & McCarthy (2000) verwendeten Strukturen vor, dass auch andere Parameter für die Superhydrophobie entscheidend sein können. Er schlägt als wichtiges Kriterium die „Kontaktliniendichte“ vor, die sich aus dem Produkt der Dichte der Erhebungen pro Fläche und ihrem Umkreis ergibt. Eine wichtige Rolle kommt dabei auch den Flanken der Erhebungen zu (Oliver *et al.*, 1977). Der mikroskopische Kontaktwinkel, der in die Betrachtung mit einfließt, entspricht dem Fortschreitwinkel an der Flanke der Erhebung. Damit ist die Steilheit der Flanken ein entscheidender Faktor dafür, ob ein Tropfen auf den Erhebungen gehalten werden kann oder nicht. Extrand (2002) betont jedoch, dass diese Betrachtung ausschließlich für Oberflächen mit einer regelmäßigen Geometrie gilt. Die vorgestellten Gleichungen auf fraktale Strukturen oder weniger geometrisch definierte Oberflächen zu übertragen, ist

sehr schwierig. Dorrer & Rühle (2006) führten ähnliche Untersuchungen an geometrisch strukturierten Oberflächen wie Öner & McCarthy (2000) durch. Sie kommen zu dem Schluss, dass der Fortschreitwinkel kaum durch Variationen der Strukturen beeinflusst wird, wohingegen der Rückschreitwinkel von der Größe der Erhebungen und ihrem Abstand abhängt.

In einer weiteren Arbeit zu diesem Thema ergänzt Extrand (2004) sein Kriterium der Kontaktliniendichte mit dem Kriterium der Höhe der Erhebungen. Diese finden sich auch in einem Patent des Autors wieder, in dem er die Herstellung stabiler unbenetzbarer Oberflächen beschreibt Extrand (2006b). Mit Hilfe der beiden Kriterien werden experimentelle Ergebnisse von Modelloberflächen anderer Wissenschaftler validiert und eine bessere Übereinstimmung mit den Daten gefunden. Nachfolgend definiert Extrand (2006a) zudem Kriterien, die notwendig sind, um eine maximale Kraft gegen das Einsacken der Tropfen zwischen die Strukturen zu erhalten. Diese Modelle lassen jedoch weitestgehend aktuelle Ergebnisse anderer Autoren außen vor, so dass ihre Allgemeingültigkeit in Frage gestellt werden kann.

Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Struktur auf die Hysterese finden sich bei Hennig *et al.* (2002) und Zhang & Kwok (2006). Über die neuesten Erkenntnisse in Bezug auf die Kontaktlinie berichten Bormashenko *et al.* (2007).

Abrollwinkel auf superhydrophoben Oberflächen

Gemäß Definition entspricht der Abrollwinkel dem Winkel, um den eine Oberfläche gekippt werden muss, bis ein auf ihr ruhender Tropfen zu rutschen oder zu rollen beginnt (Erbil, 2006). Inzwischen folgen nahezu alle Autoren der Einschätzung, dass der Kontaktwinkel als Kriterium für die extreme Unbenetzbarkeit nicht ausreicht. Eine Beziehung zwischen dem Kontaktwinkel und dem Abrollwinkel auf einer Oberfläche wurde bereits mehrfach hergestellt.

Buzágh & Wolfram (1956, 1957) und Wolfram & Faust (1978) waren die ersten, die eine Gleichung für den Abrollwinkel auf glatten Oberflächen beschrieben:

$$\sin \alpha = k \frac{2r\pi}{mg} \quad (1.7)$$

Abrollwinkel: α ; Radius der Tropfenkontaktfläche: r ; Gravitationskraft: g ; Proportionalitätskonstante: k ; Masse des Tropfens: m

Murase *et al.* (1994) und Murase & Fujibayashi (1997) modifizierten die Gleichung (1.7), um eine Beziehung zwischen dem Kontaktwinkel und dem Abrollwinkel herzuleiten. Nach k aufgelöst ergibt sich gemäß den Autoren die folgende Gleichung:

$$k = \left\{ \frac{9m^2 (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)}{\pi^2} \right\}^{1/3} \frac{\sin \alpha (g\rho^{1/3})}{6 \sin \theta} \quad (1.8)$$

Abrollwinkel: α ; Radius der Tropfenkontaktfläche: r ; Gravitationskraft: g ; Proportionalitätskonstante: k ; Masse des Tropfens: m ; spezifisches Gewicht von Wasser: ρ ; Kontaktwinkel: θ

Mit dieser Gleichung ist es möglich, die Konstante k für glatte Oberflächen anhand der messbaren Größen α , θ und m zu berechnen. Nach Murase & Fujibayashi (1997) stellt diese Konstante die Wechselwirkungsenergie zwischen Festkörper und Flüssigkeit dar. Basierend auf dieser Gleichung haben Miwa *et al.* (2000) in ihrer Arbeit einen Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel, Abrollwinkel und der Rauigkeit einer Oberfläche bei superhydrophoben Oberflächen hergeleitet. Sie präsentierten unterschiedlich strukturierte Oberflächen mit Kontaktwinkeln zwischen 147° und 160° , bei denen sie zusätzlich die Abrollwinkel bestimmt und deren Rauigkeiten mittels eines Raster-Kraftmikroskops gemessen haben. Unter Zuhilfenahme der Gleichung von Cassie & Baxter (Gl. 1.3) präsentierten die Autoren eine Modifikation der Gl. 1.8. Zur Vereinfachung wurden die Oberflächenstrukturen als feine, immer gleich gestaltete Nadeln definiert. Die Wechselwirkungsenergie sollte sich proportional zur mikroskopischen Kontaktfläche verändern und die experimentell erfassten Kontaktwinkel mit den Gleichgewichtskontaktwinkeln übereinstimmen. Unter diesen Annahmen lässt sich für die Beziehung zwischen Abrollwinkel und Kontaktwinkel auf der vorgestellten superhydrophoben Oberfläche folgende Gleichung herleiten:

$$\sin \alpha = \frac{2rk \sin \theta' (\cos \theta' + 1)}{g(r \cos \theta + 1)} \left\{ \frac{3\pi^2}{m^2 \rho (2 - 3 \cos \theta' + \cos^3 \theta')} \right\}^{1/3} \quad (1.9)$$

Abrollwinkel: α ; Radius der Tropfenkontaktfläche: r ; Gravitationskraft: g ; Proportionalitätskonstante: k ; Masse des Tropfens: m ; spezifisches Gewicht von Wasser: ρ ; Young-Kontaktwinkel: θ ; makroskopischer Kontaktwinkel: θ'

Die experimentell ermittelten Daten stimmten sehr gut mit den berechneten Werten überein. Bei Kontaktwinkeln $>158^\circ$ zeigten die Abrollwinkel jedoch wiederum eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Model von Cassie & Baxter. Offenbar reicht in diesem Fall die Annahme, dass eine konstante Rauigkeit r gegeben ist, nicht aus. Auf der Oberfläche mit dem kleinsten Abrollwinkel ($\sim 1^\circ$) und dem größten Kontaktwinkel ($\sim 160^\circ$) konnte zudem für einen Tropfen von 7 mg gezeigt werden, dass eine konstante Beschleunigung von $0,20 \text{ m/s}^2$ vorlag. Diese ist bei einem Neigungswinkel von 1° annähernd gleich der Erdbeschleunigung ($0,17 \text{ m/s}^2$). Dies zeigt, dass ein Tropfen kaum Reibungswiderstand auf einer solchen Oberfläche erfährt. Die Autoren schlagen deshalb vor, die Beschleunigung eines Tropfens auf superhydrophoben Oberflächen als ein weiteres Kriterium für die Unbenetzbarkeit heranzuziehen.

Roura & Fort (2002) bezweifeln, ob die Wechselwirkungsenergie zwischen dem Tropfen und der Oberfläche für die Beziehung zwischen Kontakt- und Abrollwinkel herangezogen werden sollte. Sie schlagen vor, dass stattdessen die Hysterese als ausschlaggebende Komponente verwendet werden soll. Einige weitere Arbeiten an unterschiedlich strukturierten Oberflächen bestätigen den Einfluss der Rauigkeit und der Kontaktliniendiskontinuität auf das Benetzungsverhalten (Shang *et al.*, 2005b; Dupuis & Yeomans, 2006; Nosonovsky & Bhushan, 2005a).

Mögliche Benetzungszustände auf strukturierten Oberflächen

Messungen von Kontaktwinkeln auf unterschiedlichsten Oberflächen zeigen, dass ein Tropfen in Abhängigkeit der Struktur verschiedene Benetzungszustände annehmen kann. Bico *et al.* (2002) erklären diese verschiedenen Zustände anhand von Messungen, die von Shibuichi *et al.* (1996) publiziert wurden. Die Autoren berechneten die Änderung der Oberflächenenergie pro Fläche (dF), die notwendig ist, um die Kontaktlinie um eine Strecke dx zu verschieben. Bico *et al.* (2002) definieren Bedingungen, unter denen ein Tropfen auf den Spitzen der Erhebungen einen thermodynamisch stabilen Zustand einnimmt (Gl. 1.10). Dabei beschreibt die Gl. 1.11 die Oberflächenenergie, die notwendig ist, um die Kontaktlinie auf einer Kompositoberfläche bestehend aus Festkörper und Gas zu verschieben (Cassie & Baxter-Kriterium o. Cassie-Zustand; Abb. 3.12a). Die Gl. 1.12 gibt die Oberflächenenergie beim Verschieben der Kontaktlinie auf einer vollständig benetzten strukturierten Oberfläche an (Wenzel-Kriterium o. Wenzel-Zustand; Abb. 3.12b).

$$\cos \theta < \frac{\Phi_s - 1}{r - \Phi_s} \quad (1.10)$$

wenn,

$$dF = \Phi_s(\sigma_{sl} - \sigma_{sg}) dx + (1 - \Phi_s)\sigma dx + \sigma dx \cos \theta^* \quad (1.11)$$

kleiner

$$dF = r(\sigma_{sl} - \sigma_{sg}) dx + \sigma dx \cos \theta^* \quad (1.12)$$

Verhältnis zwischen tatsächlicher und projizierter Oberfläche: r ; Anteil der Grenzfläche Festkörper/Flüssigkeit: Φ_s ; Oberflächenspannung Festkörper/Flüssigkeit: σ_{sl} ; Oberflächenspannung Festkörper/Gas: σ_{sg} ; Young-Kontaktwinkel: θ ; makroskopischer Kontaktwinkel: θ^*

Beträgt der Young-Kontaktwinkel jedoch um die 90° , sagen die Autoren erstmals einen metastabilen Zustand der Tropfen auf den Spitzen der Strukturen voraus. Bei einer erzwungenen Benetzung der Oberfläche sollte der Tropfen den Wenzel-Zustand bevorzugen.

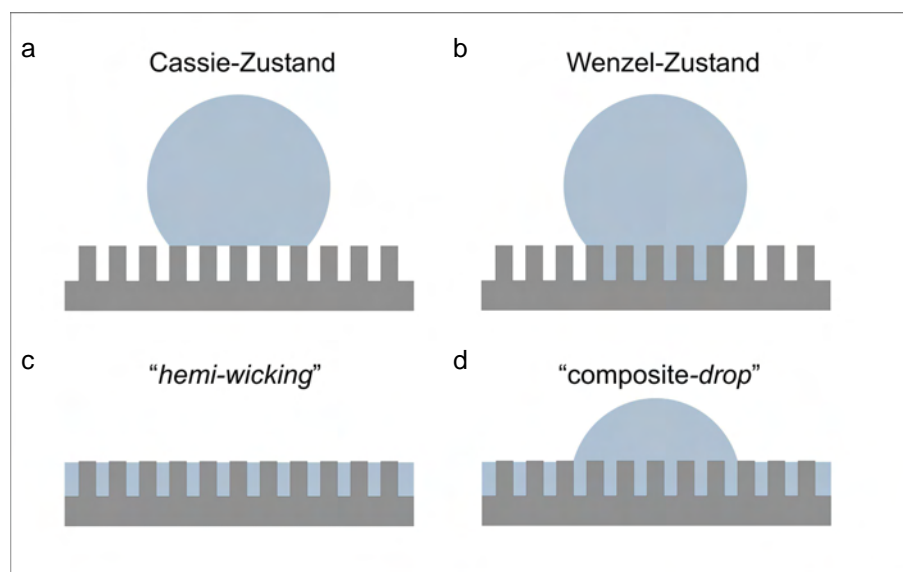


Abb. 3.12: Mögliche Benetzungszustände geometrisch strukturierter Oberflächen. (verändert nach Bico *et al.*, 2002).

Neben dem Cassie- und Wenzel-Zustand beschreiben Bico *et al.* (2002) zwei weitere Benetzungszustände strukturierter Oberflächen. Im Falle einer nicht hydrophoben strukturierten Oberfläche kann sich ein Wasserfilm zwischen den Strukturen ausbreiten, ohne jedoch die Spitzen der Erhebungen zu benetzen („*hemi-wicking*“, Abb. 3.12c). Ein weiterer möglicher Zustand, auch „*composite drop*“ genannt, besteht darin, dass von einem abgesetzten Tropfen kleine Flüssigkeitsmengen zwischen die Strukturen kriechen, der Tropfen zum Teil jedoch stehen bleibt (Abb. 3.12d). Eine ausführliche

Zusammenfassung der möglichen Benetzungszustände auf einer strukturierten Oberfläche mit den Kriterien ihrer Bildung findet sich bei Quéré (2002b, 2005) und Martines *et al.* (2005).

Lee & Amifazli (2005) führen an einer schaltbaren, geometrisch strukturierten Oberfläche vor, welcher Benetzungszustand in Abhängigkeit der Rauigkeit vorliegt. Sie erzeugten eine strukturierte Oberfläche, die von einer feinen Membran umfüllt ist. Bei Unterdruck zeichnete die Membran genau die Strukturen nach. Pneumatisch konnte die Membran allmählich angehoben werden, so dass immer weniger Rauigkeit vorlag, bis die Membran oben auf den Strukturen zum Liegen kam (glatte Oberfläche). Mit Hilfe dieser Oberfläche überprüften die Autoren die Gültigkeit der Modelle für Cassie- oder Wenzel-Benetzung.

Die Frage, ob ein Tropfen zwischen die Strukturen einsinkt oder auf diesen stehen bleibt, lässt sich auch energetisch über die Gibbs-Energie des Systems beantworten. Als Kriterium für einen „Cassie & Baxter“-Tropfen muss ein lokales Minimum der Gibbs-Energie existieren. Ist dieses nicht gegeben, sinkt der Tropfen zwischen die Strukturen ein und es gilt die Gleichung von Wenzel (vgl. Gl. 1.2). Marmur (2003) beschreibt ausgehend von der Gibbs-Energie die Kriterien, nach denen sich entscheidet welche Benetzung der Oberfläche vorliegt.

Energetische Betrachtungen der möglichen Benetzungszustände finden sich auch bei Alberti & DeSimone (2005), Jopp & Yerushalmi-Rozen (2004), Li & Amifazli (2005), Berim & Ruckenstein (2005) und Werner *et al.* (2005).

Das Phänomen der hohen Kontaktwinkel kann über Kompositoberflächen nach Cassie & Baxter (Cassie-Zustand) oder über benetzte Rauigkeiten nach Wenzel (Wenzel-Zustand) erreicht werden. Lafuma & Quéré (2003) zeigen, dass ein irreversibler Übergang vom „Cassie-“ zum „Wenzel-“ Stadium existiert. Dieser Übergang kann entweder durch Druck, Kondensation oder Evaporation herbeigeführt werden. Experimente zeigten, dass durch ein Eindrücken des Tropfens zwischen die Strukturen der Kontaktwinkel kaum kleiner wird, sich das adhäsive Verhalten der Tropfen aber stark ändert. Die Hysterese im Wenzel-Zustand ist erheblich höher, wodurch die Oberfläche ihre antiadhäsiven Eigenschaften verliert. Das erste Mal beobachteten Ren *et al.* (2002) den Verlust des antiadhäsiven Eigenschaften der superhydrophoben Oberflächen gegenüber Wasser. Beim Verdunsten von Tropfen, die über 90 Minuten auf der Oberfläche belassen wurden, änderten sich sowohl die Hysterese wie auch die Tropfenkontur dramatisch: Die ursprüngliche 166° KW nahmen nach 90 Minuten auf 18° ab. Die Autoren

interpretierten die Veränderung mit dem Einsinken des Tropfens zwischen die Strukturen der superhydrophoben Oberfläche. McHale *et al.* (2005) beobachteten ein ähnliches Verhalten der Tropfen während Verdunstung. Dabei fand der Umschlag vom Cassie- zum Wenzel-Zustand in einigen Fällen sehr plötzlich statt.

Eine weitere Möglichkeit, wie eine Umwandlung vom Cassie- in den Wenzel-Zustand stattfinden kann, ist die Kondensation von Wasser in den luftgefüllten Zwischenräumen der Strukturen (Narhe & Beysens, 2004). Cheng & Rodak (2005) behaupten, dass sogar die superhydrophobe Oberfläche des Lotusblattes (*Nelumbo nucifera*) unter Kondensationsbedingungen ihre unbenetzbaren Eigenschaften verlieren kann und eine partielle Hydrophilie zu beobachten ist. Eine ausführliche Untersuchung zum Einfluss der Kondensation auf die Unbenetzbarkeit führten Wier & McCarthy (2006) an geometrisch strukturierten Oberflächen durch. Auch sie konnten zeigen, dass ein Verlust der extremen Unbenetzbarkeit bei Kondensation erfolgt. Sie empfehlen bei Anwendungen, wo unter Kondensationsbedingungen noch ein Abrollen der Tropfen erfolgen soll, auf glatte Oberflächen zurückzugreifen, da sich raue superhydrophobe Oberflächen unter diesen Bedingungen als nachteilig erweisen. Zusammenfassend werden die adhäsiven Eigenschaften der Tropfen je nach Benetzungszustand von Quéré *et al.* (2003) wiedergegeben.

Patankar (2003) geht davon aus, dass der Wenzel-Zustand generell vorhanden ist und, falls ein geringerer Kontaktwinkel in diesem Zustand vorliegt, auch bevorzugt wird, da dies einem geringeren Energieniveau entspricht. Dass auf solchen Oberflächen aber auch ein Cassie-Zustand mit höheren Kontaktwinkeln erreicht werden kann, ist durch die Bildung der Tropfen zu erklären. Wird ein Tropfen von oben auf der Oberfläche abgesetzt, bildet sich der „Cassie“-Tropfen aus, da eine Energiebarriere zwischen Wenzel- und Cassie-Zustand besteht. Wird der Tropfen von unten beispielsweise durch eine Kapillare auf die Oberfläche herausgedrückt, wodurch zunächst die Zwischenräume benetzt werden, entsteht der bevorzugte „Wenzel“-Tropfen. Die Energiebarriere kann auch durch einen aus gewisser Höhe auf die Oberfläche fallenden Tropfen überwunden werden. Umgekehrt wird der Cassie-Zustand bevorzugt, wenn der dazugehörige Kontaktwinkel geringer ist als im Wenzel-Zustand. Patankar (2003) berechnet die Energiezustände der Tropfen auf einer geometrisch strukturierten Oberfläche und führt an einem Modell vor, unter welchen Bedingungen welcher Zustand favorisiert wird. Seine Modelle präzisiert der Autor in einer späteren Arbeit und führt Kriterien zur Vorhersage der favorisierten Zustände der Tropfen an (Patankar,

2004a). Ähnliche Arbeiten führten He *et al.* (2003) und Anantharaju *et al.* (2006) sowohl theoretisch, wie auch experimentell an geometrisch strukturierten Oberflächen durch.

Wie der Cassie-Zustand der Tropfen auf einer Oberfläche stabilisiert werden kann, ist eine wichtige Frage für technische Anwendungen. Marmur (2004) berechnet an einer idealisierten Modelloberfläche nach dem Vorbild der Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera*), welche Auswirkungen Abstand und Strukturform auf die benetzte Fläche haben. Diese Parameter werden als indirektes Maß einer geringen Hysterese aufgefasst. Basierend auf der Form der Zellpapillen bei Lotus wird die Form der einzelnen Strukturen als eine dreidimensionale Parabel angenommen. Bei Variation der Höhe und der Abstände ergibt sich für den Cassie-Zustand eine Unabhängigkeit des Kontaktwinkels, sowohl von der benetzten Fläche als auch von den Strukturabständen (so lange die Distanz nicht zu groß wird). Für solche Oberflächen ergeben sich drei Vorteile:

- 1) Für die meisten Kombinationen von Höhe und Abstand wird im Cassie-Zustand ein höherer KW erreicht als im Wenzel-Zustand.
- 2) Der KW eines Tropfens im Cassie-Zustand ist weitestgehend unabhängig von dem Abstand der Erhebungen und nur geringfügig sensitiv für die Höhe der Strukturen.
- 3) Bei gleichen KW im Cassie- und Wenzel-Zustand ist die benetzte Fläche beim Cassie-Zustand erheblich geringer.

Der KW bei *N. nucifera* ist demnach nur wenig anfällig gegenüber Abweichungen der Strukturabstände. In jedem Fall jedoch ist der Cassie-Zustand nur metastabil. Der Wenzel-Zustand mit einem geringeren KW ist thermodynamisch stabiler.

Einen Verstärkungs- oder Abschwächungsfaktor für die Veränderung der Benetzbarkeit je nach Wenzel- oder Cassie-Zustand stellt McHale *et al.* (2004a) vor. Mit Hilfe dieses Faktors lassen sich die strukturbedingten Änderungen der KW je nach Benetzungszustand erklären. Besonders die Veränderung der Hysterese kann mit diesem Faktor vorhergesagt werden. Basis für die Berechnung ist die Kenntnis des Young-Kontaktwinkels und der Rauigkeit der Oberfläche. Zum Einfluss der Struktur auf die Benetzungszustände, besonders im Hinblick auf die durch Rauigkeiten gesteuerte Benetzung einer Oberfläche berichten McHale *et al.* (2004c).

Auch Martines *et al.* (2005) untersuchten auf unterschiedlich geometrisch strukturierten Oberflächen die Benetzungszustände und stellten fest, dass die Form der Erhebungen und die Krümmung der Ecken einen Einfluss auf den Abrollwinkel haben.

Die Auswirkung der Benetzungszustände auf die Entnetzung einer Oberfläche untersuchen Fresnais *et al.* (2006). Sie prüften wie schnell eine geschlossene Wasserfläche mittels eines Luftstrahls entnetzt werden konnte. Je nachdem, ob Wenzel oder Cassie-Benetzung vorlag, erfolgte die Entnetzung unterschiedlich schnell und mit einer anderen Charakteristik. Die Methode erlaubt Rückschlüsse über die Dynamik und Hysterese des Wassers auf der Oberfläche.

Bedeutung von Strukturhierarchien für die Unbenetzbarkeit

Doppeltstrukturierte Oberflächen, ähnlich denen von *N. nucifera* (Barthlott & Neinhuis, 1997), führen zu energetisch bevorzugten Cassie-Tropfen. Bei bestimmter Strukturierung ist der Wenzel-Zustand sogar physikalisch unmöglich (Patankar, 2004b). In dieser Arbeit wird am Beispiel einer geometrisch doppeltstrukturierten Oberfläche ein Modell zur Vorhersage der Benetzbarkeit vorgestellt, um Oberflächen mit geringer Hysterese und stabilem Cassie-Zustand generieren zu können. Ein ähnliches Ergebnis zeigen Carbone & Mangialardi (2005). Auf einer sinusförmigen Struktur, ähnlich wie bereits bei de Gennes *et al.* (2004) beschrieben, werden im Modell Parameter berechnet, welche das Kompositstadium der Tropfen auf der Oberfläche stabilisieren. Zusätzlich wird der Druck berechnet, der notwendig ist, um ein Umschlagen in vollständige Benetzung zu erwirken. Die doppeltstrukturierten pflanzlichen Oberflächen stellen Carbone & Mangialardi (2005) nach eine Notwendigkeit dar, um einen stabilen Cassie-Zustand zu erreichen. Sie gehen dabei von einer nur relativ geringen Hydrophobie der Wachse aus. In diesem Fall ist eine zusätzliche Strukturierungsebene notwendig. Ähnlich argumentieren auch Lafuma & Quéré (2003), die ebenfalls die Doppelstruktur der Pflanzen als eine Optimierung der extremen Unbenetzbarkeit der Oberfläche ansehen. Bhushan & Jung (2006) wiederum behaupten, dass die Feinstruktur (Wachsstruktur) bei Pflanzen eine entscheidende Rolle für die Unbenetzbarkeit spielt. Sie vermaßen pflanzliche Oberflächen profilometrisch und diskutierten den Einfluss der einzelnen gefundenen Strukturebenen auf Adhäsion und Benetzung. Basierend auf ihren Ergebnissen haben die Autoren ein Patent angemeldet (Bhushan & Nosonovsky, 2006). Über die Rolle der Doppelstruktur bei Pflanzen wurde lange spekuliert, da eine Herstellung geometrischer doppeltstrukturierten Oberflächen schwierig ist. Diese sind aber für die physikalische Klärung der Benetzung notwendig. Zhu *et al.* (2005a) waren die ersten, die eine entsprechende Oberfläche schaffen und anhand von Modellen und Experimentergebnissen die Bedeutung der Doppelstruktur diskutieren konnten. Sie

stellten photolithographische Siliziumoberflächen mit zylindrischen Erhebungen unterschiedlicher Höhen und Abständen her. Diese dienten als Kontrolloberflächen mit Einfachstruktur. Ausgerichtete Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) bildeten Oberflächen mit zwei Strukturebenen. Bei geringen Höhen von bis $10\mu\text{m}$ bestanden die Oberflächen ausschließlich aus den CNT, die in einem Belichtungsprozess mit ähnlichen Strukturabständen hergestellt wurden wie die Kontrolloberflächen. Um noch höhere Strukturen zu erzeugen, wurden Oberflächen hergestellt, die eine Kombination aus den siliziumstrukturierten und den CNT-Oberflächen aufwiesen. Es zeigte sich, dass die Nanostrukturen keine signifikante Erhöhung des Kontaktwinkels bewirkten. Dies bedeutet, der makroskopische Kontaktwinkel wird von der Mikrostruktur bestimmt, vorausgesetzt, diese Strukturebene ist gegenüber der Nanostruktur dominant. Jedoch konnten die Autoren nicht klären, unter welchen Bedingungen welche Dominanz vorliegt. Die Nanostruktur vermag jedoch die Hysterese stark zu reduzieren und stabilisiert so die Superhydrophobie, gleichzeitig ersetzt sie die Notwendigkeit der Mikrostruktur für superhydrophobe Oberflächen.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Shirtcliffe *et al.* (2004a) und Gao & McCarthy (2006a). Letztere gehen davon aus, dass noch ein thermodynamischer Effekt mit einer Rolle spielt. Der Laplace-Druck der Tropfen wird verstärkt, wenn doppelstrukturierte Oberflächen vorliegen.

Einen besonders stabilen Cassie-Zustand bei einer nur einfach strukturierten Oberfläche präsentierten Journet *et al.* (2005). Ihre Oberfläche bestand aus dicht beisammen stehenden Kohlenstoffnanoröhrchen, die einen Durchmesser von 50-100 nm, einen Abstand von 100-250 nm und eine Höhe im Mikrometerbereich aufwiesen. Ein abgesetzter Tropfen erreichte auf dieser Oberfläche einen Kontaktwinkel von $\sim 164^\circ$, der sich auch bei einem ausgeübten Druck von 10kPa kaum änderte. Auch die Hysterese blieb unvermindert klein. Bei einem ähnlichen Versuch zum Wechsel der Benetzungszustände beim Eindringen eines Tropfen zwischen die Strukturen beobachteten Lafuma & Quéré (2003) bereits ein Umschlagen vom Cassie- zum Wenzel-Zustand bei $\sim 0,2\text{kPa}$. Sie verwendeten eine Oberfläche bestehend aus $2\mu\text{m}$ Nadeln mit $2\mu\text{m}$ Abstand.

Die bisherigen Arbeiten ziehen idealisierte Modelloberflächen für die Diskussion des Struktureinflusses auf die Unbenetzbarkeit heran. Viele technische und alle biologischen Oberflächen weisen jedoch eine erheblich komplexere Strukturierung auf. Häufig sind mehrere Längenskalen von Nanometerdimensionen bis in den makroskopischen Bereich

an der Strukturierung beteiligt. Zudem sind die Strukturen nicht präzise geometrisch orientiert, sondern chaotisch und fraktal aufgebaut und die Oberflächenchemie kann heterogen sein. Bei solchen Oberflächen fällt der Rückschluss über den Einfluss der Struktur auf die Unbenetzbarkeit aufgrund der Unkenntnis der genauen Geometrie und der immer noch andauernden Diskussion über einige physikalische Grundlagen sehr schwer. Einige Arbeiten versuchen dennoch die Benetzung auf komplex strukturierten Oberflächen zu erklären, da diese Daten für technische Anwendungen besonders wichtig sind (Kijlstra *et al.*, 2002). Eine direkte Visualisierung der Grenzfläche zwischen Wasser/Luft und Festkörper würde bei der Analyse der Benetzungszustände sehr helfen. Ein Methode hierzu präsentieren Doshi *et al.* (2005).

Zahlreiche weitere Modelle zur Vorhersage der Benetzbarkeit strukturierter Oberflächen und zum Verständnis der Benetzungsvorgänge auf diesen Oberflächen bis hin zum atomaren Maßstab finden sich bei Patankar (2002), Lundgren *et al.* (2003,2007), Werner *et al.* (2003), Pal *et al.* (2005), Dupuis & Yeomans (2005a, 2005b), Chen *et al.* (2005), Porcheron & Monson (2006) und Yang *et al.* (2006).

Herstellung superhydrophober Oberflächen

Während noch vor zwei Jahrzehnten die Strukturierung von Materialien im Nano- und Mikrometerbereich große Schwierigkeiten bereitete, existieren heutzutage zahlreiche Methoden zur Schaffung geometrischer, chaotischer oder selbstorganisierender Strukturen auf Oberflächen unterschiedlichster Materialien. Die wichtigsten werden nachfolgend kurz vorgestellt.

Photolithographie

Einen der wichtigsten Herstellungsprozesse von Mikro- und Nanostrukturen stellt die Photolithographie dar (Rogers, 2004). Diese ist durch mehrere Schritte gekennzeichnet. Zunächst werden auf ein Substrat lichtsensitive Schichten aufgetragen. Eine darüber gelegte Photomaske schützt in der nachfolgenden Bestrahlung Teile der sensitiven Schicht, die später den Strukturen entsprechen soll. Im darauf folgenden Schritt werden die Strukturen durch ein Ätzbad entwickelt. Durch die Bestrahlung ist der nicht abgeschattete Teil der Oberfläche gegenüber der Ätzflüssigkeit empfindlich und wird herausgelöst. Übrig bleiben die von der Photomaske abgeschatteten Anteile (Lambda Physik GmbH, 1998). Anschließend werden die Strukturen gehärtet und hydrophobiert. Auf diese Weise können geometrische Strukturen wie Prismen oder Quader entstehen.

Diese Modelloberflächen eignen sich sehr gut für Untersuchungen zur Benetzbarkeit von Oberflächen (Kawai & Nagata, 1994; Öner & McCarthy, 2000; Bico *et al.*, 2002; Shirtcliffe *et al.*, 2004b; Zhu *et al.*, 2005a; Dorrer & Rühle, 2006; Pozzato *et al.*, 2006). Allerdings sind großflächige Strukturierungen nach dieser Methode sehr aufwendig und kostspielig.

Plasmabeschichtungen

Für Untersuchungen zum Einfluss der Rauigkeit auf die Benetzbarkeit von Polytetrafluorethylen (PTFE) wurden von Veeramasuneni *et al.* (1997) Oberflächen mittels Plasmabeschichtung hergestellt. Durch unterschiedliche elektrische Spannungen beim Beschichtungsprozess erfolgte eine Variation der Rauigkeiten. Die auf diese Weise hergestellten Oberflächen wiesen einen Fortschreitwinkel von 150° - 160° auf, ihre Rauigkeiten lagen im Bereich weniger Nanometer (6-13 nm). Jedoch zeigten die vorgestellten Oberflächen relativ hohe Hysteresen, so dass, obwohl damals nicht diskutiert, wahrscheinlich auf allen Oberflächen der Wenzel-Zustand vorlag. Eine weitere PTFE-Beschichtung zur Erzeugung einer unbenetzbaren Oberfläche beschreiben Nitschke *et al.* (2002).

PTFE-Plasma-beschichtete Polypropylenoberflächen mit einer Hysterese von nur 3° erzielten Youngblood & McCarthy (1999). Über die Herstellung von superhydrophoben Oberflächen mittels PTFE-Plasmabeschichtungen wurden mittlerweile zahlreiche weitere Arbeiten publiziert (Washo, 1982; Morra *et al.*, 1989; Coulson *et al.*, 2000a, 2000b; Favia *et al.*, 2003). Mittels CF_4 -Plasma erzielten Woodward *et al.* (2003) bei Polybutadiene-Oberflächen Superhydrophobie. Auch auf anderen Materialien können mittels Plasma-Beschichtungen superhydrophobe Oberflächen erzeugt werden (Höcker, 2002; Teare *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2005; Tserepi *et al.*, 2005; Lejeune *et al.*, 2006;).

Lacke

Mit Hilfe von Polytetrafluorethylen (PTFE) Partikeln können superhydrophobe Lacke realisiert werden. Auf Oberflächen solcher Pulverlacke werden KWs von mehr als 150° erreicht. In Konditionierungstests, die eine Alterung der Lacke simulieren, wurden Funktionsdauern entsprechend 20 Jahren Freilandexposition erzielt (Yamauchi *et al.*, 1996).

Eine auf Glas ausgegossene Dispersion aus Polyvinylidenfluorid (PVDF), einem Hochleistungskunststoff mit hervorragender chemischer Beständigkeit, CaCO_3 und Dynasylan® (F8261, Degussa) führt zu mikro- und nanostrukturierten Oberflächen mit Kontaktwinkeln von 153° und extrem geringen Abrollwinkeln (Yan *et al.*, 2003). Diese Methode der Herstellung superhydrophober Oberflächen ist besonders einfach und kostengünstig. Weitere superhydrophobe Lacke und ihre Herstellung werden von Wulf *et al.* (2002) oder Saito (1996) beschrieben. Weitere Lacke mit unbenetzbaren Eigenschaften erzeugen Gaus *et al.* (2000), Reihls *et al.* (2000) und Zimmermann *et al.* (2004).

Elektrospinn-Verfahren

Die Abscheidung von Copolymeren über ein einfaches Elektrospinn-Verfahren führt zu Oberflächen mit sehr unterschiedlicher Strukturierung, wobei die Strukturvariationen über die Viskosität der Copolymere eingestellt werden können (Acatay *et al.*, 2005a, 2005b). Ein Zusammenhang zwischen dem Molekulargewicht der Copolymere und dem KW auf den entsprechenden Oberflächen wurde nachgewiesen. Wie Druckuntersuchungen (Tropfen wurde zwischen zwei Platten deformiert) zeigen konnten, waren einige der hergestellten Oberflächenstrukturen anfällig gegenüber dem Wenzel-Zustand des Tropfens. Bei einer Oberfläche, die aus mehreren hierarchischen Strukturebenen bestand, wurde ein sehr stabiler Cassie-Zustand nachgewiesen. Selbst ein Druck von 400 mPa konnte den KW im Druckexperiment nicht ändern. Die unbenetzbarste Oberfläche erreichte einen KW von annähernd 167° und einen Abrollwinkel von $4,3^\circ$. Das Elektrospinn-Verfahren eignet sich auch zur Herstellung superhydrophober Nanofasern aus anderen Materialien (Singh *et al.*, 2005). Weitere superhydrophobe Oberflächen die mit dem Elektrospinn-Verfahren hergestellt wurden, beschreiben Agarwal *et al.* (2006), Miyauchi *et al.* (2006), Zhu *et al.* (2006b) und Ogawa *et al.* (2007). Über eine Kombination aus Elektrospinn und CVD (s.u.) stellten Ma (2005) superhydrophobe Oberflächen mit KWs von bis zu 175° her. Eine Übersichtsarbeit über die Herstellung von unbenetzbaren Oberflächen mit Hilfe dieser Methode findet sich bei Allcock *et al.* (2006).

Beschichtungen mittels Sublimation

Beschichtungen für optische Anwendungen präsentierten Duparré *et al.* (2001, 2002). Superhydrophobe Oberflächen zeigen normalerweise aufgrund ihrer Strukturierung eine

veränderte Lichtstreuung. Transparente superhydrophobe Beschichtungen für optische Anwendungen wie beispielsweise Glas hätten jedoch ein hohes wirtschaftliches Potenzial. Den Autoren gelang es, ZrO_3 auf einer Oberfläche über Elektronenstrahlverdampfung abzuscheiden, wobei die Transparenz des Substrats nahezu vollständig erhalten blieb. Je nach Substrattemperatur und Depositionsraten wurden unterschiedliche Strukturen auf der Oberfläche erzeugt. Nach einer nachträglichen Hydrophobierung mit Gold-Thiol wurde eine Oberfläche mit einem Kontaktwinkel von 143° und einem Abrollwinkel $<10^\circ$ erzeugt, die gleichzeitig lediglich 0,2-0,1% Lichtstreuung aufwies. Duparré *et al.* (2002) stellen zudem ein Modell vor, mit dem direkt eine Korrelation zwischen dem Kontaktwinkel und der Lichtstreuung hergeleitet werden kann. Ebenfalls transparente superhydrophobe Oberflächen erzeugten Nakajima *et al.* (1999) mittels Sublimierung von Aluminium-Acetylacetonaten und einige Jahre zuvor Ogawa *et al.* (1993) über Fluorcarbone.

Herstellung transparenter Beschichtungen

Eine sehr beständige transparente Beschichtung, die im Freilandversuch über 1800 Std. nahezu unverändert extrem unbenetzbar blieb, wurde von Nakajima *et al.* (1999, 2000) entwickelt. Dies ist besonders erstaunlich, da als Zugabe TiO_2 enthalten war, das für seine sehr hohe Oberflächenenergie bekannt ist. TiO_2 wird bei Oberflächen eingesetzt, die eine extreme Hydrophilie (Superhydrophilie), also genau das umgekehrte Phänomen der Unbenetzbarkeit, aufweisen sollen. War das TiO_2 in einer Konzentration von 2% enthalten, lag der Kontaktwinkel nach der Freilandexposition höher als bei den Vergleichsoberflächen. Weitere transparente superhydrophobe Beschichtungen beschreiben Tadanaga *et al.* (1997), Shang *et al.* (2005a), Sasaki *et al.* (2004), Kim *et al.* (2007) und Xu *et al.* (2005b).

Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)

Eine Herstellungsmethode ebenfalls transparenter superhydrophober Oberflächen bei Materialien aus Polyethyleneterephthalat (PET) präsentierten Teshima *et al.* (2003). Sie erzeugten die Oberflächen in zwei Schritten. Zunächst wurden die Oberflächen über ein Sauerstoffplasma aufgeraut und hydrophilisiert. Im zweiten Schritt wurden über die chemische Gasphasenabscheidung (CVD) Organosilane abgesondert, welche die Hydrophobierung der strukturierten Oberflächen bewirkten. Die Strukturdimensionen bewegten sich im Bereich von 50-200 nm und wirkten sich dadurch nicht auf die

optischen Eigenschaften des PET aus. Der KW der Oberfläche betrug gleichzeitig $>150^\circ$. Da das Verfahren bei relativ niedrigen Temperaturen funktioniert, eignet es sich zur Herstellung superhydrophober Kunststoffe unterschiedlicher Art. Ähnlich gingen auch Hozumi & Takai (1998) bei der Herstellung einer Oberfläche vor, sie schieden jedoch Silane ab.

Weitere über CVD erzeugte Oberflächen, die zum Teil auch transparent waren, beschreiben Wu *et al.* (2002), Zhai *et al.* (2004), Liu *et al.* (2004), Yang *et al.* (2005), Artus *et al.* (2006) und Gao & McCarthy (2006a).

Strukturierung von Metallen

Die Edelmetalle Gold, Platin und Palladium eignen sich trotz ihrer Hydrophilie für die Herstellung von superhydrophoben Oberflächen (Love *et al.*, 2002). Dafür werden sphärische Siliziumkolloide mit Durchmessern von 100-500 nm verwendet, die auf einer Oberfläche abgeschieden und mit den Edelmetallen beschichtet werden. Da bei diesem Prozess immer nur die Hälfte einer Siliziumkugel beschichtet wird, kann in einem anschließenden Säurebad (Flusssäure) das Silizium entfernt werden. Übrig bleiben nur die metallischen Halbschalen. Werden diese wiederum auf eine Oberfläche aufgebracht und hydrophobiert, entstehen Oberflächen mit Kontaktwinkeln von bis zu 155° und Abrollwinkeln nahe 1° .

Inzwischen gibt es zahlreiche Möglichkeiten zur Strukturierung von Metallen über galvanische Verfahren. Die erzeugten Oberflächen weisen nach einer anschließenden Hydrophobierung superhydrophobe Eigenschaften aus. Die Herstellung von superhydrophobem Aluminium wurde erstmals von Shibuichi *et al.* (1998) beschrieben. Die Autoren zeigten, dass bei Einsatz von Fluor-basierten Beschichtungsmitteln das Aluminium sogar Öl-abweisend wurde. Eine Übersichtsarbeit über die Strukturierung von Aluminium mittels unterschiedlichster Verfahren findet sich bei Thieme *et al.* (2000, 2001, 2003) und Hennig *et al.* (2002). Die Strukturierung von Kupfer, sowohl galvanisch wie auch über Ätzverfahren, beschreiben Shirtcliffe *et al.* (2005a). Variationen eines Galvanikprozesses zur Herstellung „Lotus-ähnlicher“ Strukturen bei Kupferphosphatdihydrat-Filmen werden bei Wu *et al.* (2005) beschrieben. Über Zinkoxid-Strukturierung mittels elektrochemischer Behandlung berichten Li *et al.* (2003). Der ursprünglich glatte Zinkoxidfilm wies nach Hydrophobierung einen Kontaktwinkel von ca. 128° auf. Durch die elektrochemische Behandlung wurden Mikro- und Nanostrukturen erzeugt, die zu einem Kontaktwinkel von ca. 152° führten. Eine

weitere, sehr einfache Herstellungsmethode für Zinkoxid-Oberflächen präsentieren Wu *et al.* (2005b).

Durch spezifische Behandlungen können inzwischen nahezu alle Metalle extrem unbenetzbar gemacht werden. Die Oberflächen zeigen nach einer zusätzlichen Hydrophobierung mit Fluorcarbonen, je nach dem Grad der Strukturierung, Kontaktwinkel von bis zu 160° . In Abhängigkeit der Oberfläche wurden hohe Kontaktwinkel über den Wenzel- oder den Cassie-Zustand erreicht (Shirtcliffe *et al.*, 2005a). Mit Hilfe von elektrochemisch abgeschiedenem Gold (Zhang *et al.*, 2004b) oder Silber (Shi *et al.*, 2006) können ebenfalls Oberflächen erzeugt werden, die nach Hydrophobierung superhydrophobe Eigenschaften aufweisen. Kontaktwinkel von bis zu 173° können auf diesen erreicht werden.

Weitere Methoden, um unterschiedliche Metalle zu strukturieren und superhydrophobe Eigenschaften zu erzielen, werden von Lappan *et al.* (2000), Han *et al.* (2005c), Liu *et al.* (2005), Qian & Shen (2005), Guo *et al.* (2005, 2006), Zhang (2006b), Chen *et al.* (2006), Wang *et al.* (2006b), Gerstel *et al.* (2006) und Chen *et al.* (2007) beschrieben.

Herstellung superhydrophober Textilien

Textilien gehörten zu den ersten Materialien, die unbenetzbar ausgestattet wurden (Gao & McCarthy, 2006c; Hongu & Philips, 1990; Teijin Ltd., 1983). Verschiedene Polyesterstoffe, die im klinischen Bereich eingesetzt werden sollen, zeigten in Untersuchungen hohe bis extreme Unbenetzbarkeit (Pociute *et al.*, 2003). Mittels Nano-Beschichtungen lassen sich Polyesterstoffe mit Kontaktwinkeln von über 160° erzielen (Luzinov *et al.*, 2004). Auch Baumwolle kann mittels Siliziumbeschichtungen bei verhältnismäßig geringen Temperaturen superhydrophob ausgestattet werden (Daoud *et al.*, 2004). Unbenetzbare Textilien stellten Höcker (2002) und Zhang *et al.* (2003) mittels Plasma her. Die Erfassung des Kontaktwinkels auf Textilien ist wegen der starken makroskopischen Unebenheit der Gewebe schwierig. Marte & Hochstrasser (2005) stellten deshalb eine neue Methode für Textilien vor, mit deren Hilfe die Unbenetzbarkeit erfasst werden kann.

Sonstige Verfahren zur Erzeugung extrem unbenetzbarer Oberflächen

Auch **Templateffekte** können für die Herstellung von superhydrophoben Oberflächen genutzt werden. Feng *et al.* (2003a) berichten über Nanofasern aus Polyvinylalkohol (PVA), die durch eine Aluminiumoxid-Membran mit Poren mittels Extrusion senkrecht

zu Oberfläche orientiert auspolymerisieren. Obwohl PVA eigentlich ein hydrophiles Material ist (Young-Kontaktwinkel $\sim 72^\circ$), wird durch die Strukturierung ein Kontaktwinkel von $\sim 171^\circ$ erreicht.

Über ein mikroporöses Fluorpolymer erzielten Yabu *et al.* (2005; 2006) selbstorganisierte, hoch geordnete Oberflächen mit Kontaktwinkeln bis zu 170° . Dabei nutzten sie Wassertropfen als Template aus. Die Tropfen wurden auf der noch flüssigen Polymerlösung durch Kondensation erzeugt. Dadurch entstand eine hochgeordnete Anordnung der Tropfen, die anschließend weiter mit dem Fluorpolymer in seiner gasförmigen Form „beschichtet“ wurden. Nach der Verdunstung des Lösungsmittels blieb ein mikroporöses festes Polymer übrig, das sehr einfach in zwei Folien aufgetrennt werden konnte. Die obere Fläche wies eine Bienenwabenstruktur auf, während die untere einem hoch geordneten Nagelkissen glich. Diese einfache Methode ist für die Produktion von sehr großen Oberflächen mit einer genau definierten Struktur von großer Bedeutung.

Die Aufgabe, mit einem Material mit geringem Youngs-Kontaktwinkel von nur ca. 75° durch Strukturierung eine Oberfläche mit einem KW von annähernd 180° zu erzielen, gelang Hosono *et al.* (2005). Ihre Oberfläche wurde in einem „**bottom-up-Prozess**“ basierend auf Metall- und Hydroxiden hergestellt. Sie erzeugten eine nadelartige Struktur, deren Spitzen einen Durchmesser von nur 6,5 nm besaßen. Auf $3\mu\text{m}^2$ entstanden im Kristallisationsprozess 166 solcher Nadeln. Damit wurde der Festkörperanteil (nach Cassie & Baxter) auf $6,12 \times 10^{-4}$ reduziert, wodurch sich rechnerisch ein Kontaktwinkel von $177,8^\circ$ ergab. Die Forscher maßen auf ihrer erzeugten Oberfläche einen KW von 178° , was nahezu exakt mit dem berechneten Wert übereinstimmte.

Mittels **physikalischer Gasphasenabscheidung** von n-Hexatriacontane gelang Tavana *et al.* (2006) die Herstellung einer chemisch beständigen superhydrophoben Oberfläche.

Mit Hilfe von Fluor erzeugten Jung *et al.* (2002) wasser- und ölabweisende Oberflächen. Sie nutzen dafür **selbstorganisierende Monolayer (SAM)**. Ähnlich arbeiteten auch Schondelmaier *et al.* (2002), Pacifico *et al.* (2006) und Cho *et al.* (2006). Ebenfalls selbstorganisiert bildeten Ji *et al.* (2006) in einem einfachen Tauchprozess Multilayer auf silanbeschichteten Oberflächen. Auf diese Weise erzeugten sie Oberflächen mit KWs von bis zu 172° und AWs von $6,5^\circ$. Eine Oberfläche mit einem allmählichen Übergang von Superhydrophobie zu Superhydrophilie stellten Yu *et al.* (2006), ebenfalls über

selbstorganisierende Monolayer (SAM), her. Eine solche Oberfläche eignet sich beispielsweise für die Kontrolle von Tropfen auf Oberflächen.

Polyalkylpyrrole eignen sich sehr gut für thermisch stabile superhydrophobe Oberflächen. Durch eine **elektrochemische Polymerisation** dieser Substanzen lassen sich auf einer Oberfläche nadelartige Auswüchse erzeugen, die zu Wasser einen Kontaktwinkel von etwas mehr als 150° besitzen. Dieser Kontaktwinkel wird auch zu anderen Substanzen wie Ölen und Lösungsmitteln erreicht. Zudem bleibt die Schicht auch bei 80°C noch intakt (Yan *et al.*, 2005). Ebenfalls elektrochemisch strukturieren Wang *et al.* (2007) Silizium und erhalten auf diese Weise unbenetzbare Oberflächen.

Eine sehr einfache Methode, wie aus einer hydrophoben eine superhydrophobe Oberfläche hergestellt werden kann, zeigten Zhang *et al.* (2004a). Über die **Dehnung** einer Teflon®folie um bis zu 190%, wobei die enthaltenen Faserkristalle voneinander getrennt wurden, entstand eine poröse Oberfläche deren Kontaktwinkel von ursprünglich 118° (0% Dehnung) auf 165° (190% Dehnung) stieg. Um Superhydrophobie zu erreichen ist mit dieser Methode eine Dehnung von ca. 90% ausreichend. Ebenfall mit Teflon® arbeiten (van der Wal & Steiner, 2007), die mit Hilfe von selbstorganisierenden Teflon®, Polystyren- und Poly(styren-co-divinylbenzen)-Partikeln superhydrophobe Oberflächen mit KW von bis zu 170° herstellen.

In den letzten Jahren ist mit der Erforschung von „**Nanotubes**“ immer häufiger auch deren Verwendung für superhydrophobe Oberflächen beschrieben worden. Kohlenstoff-Nanoröhrchen eignen sich für unbenetzbare Oberflächen, die in einer pH-Spanne von 1,1 bis 13,8 funktionieren (Feng *et al.*, 2003b). Solche Oberflächen widerstehen selbst starken Säuren und Laugen und eignen sich damit für Anwendungen im Korrosionsschutz. Kohlenstoff-Nanoröhrchen verwendeten auch Sun *et al.* (2003), Li *et al.* (2002) und Li *et al.* (2006c). Superhydrophobe Oberflächen über „Nanotubes“ aus PTFE erzielten Lau *et al.* (2003) und Fan *et al.* (2004) über „Nanorod arrays“ aus Silizium. „Nanofiber arrays“ aus Kohlenstoff verwendeten Hsieh *et al.* (2006) um unbenetzbare Oberflächen zu generieren. Ebenfalls Nanofasern verwendeten Zhu *et al.* (2006b). Sie untersuchen neben der Benetzung auch deren konduktive und magnetische Eigenschaften. Komplizierte Nanostrukturen auf Silizium können mittels Glanzwinkel-Deposition erzeugt werden (Tsoi *et al.*, 2004). Auf diese Weise sind geneigte oder helikale Nanosäulen möglich. Eine Übersichtsarbeit zu dem Thema „Benetzung von Nanotubes“ wurde von (Liu *et al.*, 2006a) zusammengetragen.

Auch im Bereich der **Kunststoffe** sind zahlreiche Anwendungen für unbenetzbare Oberflächen möglich. Die Literatur zu dieser Thematik ist entsprechend umfangreich. Erbil *et al.* (2003) berichten über eine sehr einfache Methode zur Strukturierung von Polypropylen allein über den Einsatz bestimmter Lösungsmittel. Eine weitere Kunststoffart, Polydimethylsiloxan (PDMS), konnte mittels CO₂-Laser in eine superhydrophobe Oberfläche umgewandelt werden. Khorasani & Mirzadeh (2004) zeigten, dass dieser funktionalisierte Kunststoff eine bessere Blut-Kompatibilität besitzt als die vergleichbare glatte Probe. Dadurch sind zahlreiche medizinische Anwendungen denkbar. Nun *et al.* (2002) präsentieren superhydrophobe Kunststoffe, die über Prägeverfahren oder partikuläre Beschichtungen erzielt werden können. Auf der Basis von Polymethylmethacrylat (PMMA) und fluormodifiziertem Polyurethan (FPU) beschreiben Xie *et al.* (2004) eine Herstellungsmethode für hierarchisch strukturierte superhydrophobe Oberflächen. Mittels elektrohydrodynamischen Techniken zur Erzeugung von Nanofasern aus Polystyren (PS), die mit Partikeln gleichen Materials kombiniert werden, gelangen Jiang *et al.* (2004a) ebenfalls unbenetzbare Kunststoffoberflächen mit Kontaktwinkeln um 160°. Weitere Strukturierungsmöglichkeiten für Polymere präsentierten Genzer & Efimenko (2000), Lu *et al.* (2005), Xie *et al.* (2004), Han *et al.* (2006), Bormashenko *et al.* (2006) und Vogelaar *et al.* (2006). Die Methode von Vogelaar *et al.* (2006) eignet sich für die Herstellung von Oberflächen mit zwei Strukturebenen, die unabhängig voneinander variiert werden können. Dabei ist eine Anpassung der unbenetzbaren Eigenschaften nach Wunsch möglich.

Leitende Polymere haben in den letzten Jahren viele neue Anwendungen gefunden, beispielsweise in LEDs oder in Transistoren. Um Beschädigungen durch Feuchtigkeit zu vermeiden, wären superhydrophobe Oberflächen in diesem Bereich ideal. Nicolas *et al.* (2006) zeigten für das leitfähige Polymer Polythiophen, dass eine Strukturierung über elektrochemische Verfahren möglich ist und Kontaktwinkel bis 153° erreicht werden können.

Eine einfache Möglichkeit, um eine superhydrophobe Oberfläche herzustellen, ist die **Replikation**. Je nach Methode oder Verfahren werden die unbenetzbaren biologischen Vorbilder mehr oder weniger gut abgeformt. Im ersten Schritt wird eine Abgussmasse verwendet, die möglichst gut die Oberfläche nachzeichnet und ohne größere Formveränderungen aushärtet. Anschließend wird die biologische Oberfläche entfernt, ein Negativ der Oberfläche bleibt übrig. Dieses Negativ wiederum wird mit Lacken oder

Kunststoffen ausgegossen. Nach dem Aushärten liegt eine Kopie (Positiv) der ursprünglichen Oberfläche vor. Je nach verwendetem Material ist eine zusätzliche Hydrophobierung der Oberfläche notwendig, um eine superhydrophobe Oberfläche zu erhalten (Sun *et al.*, 2005a, Mock *et al.*, 2005; Osawa *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006).

Ähnlich wie ein Replikationsverfahren funktionieren auch **Prägeverfahren**. Jedoch werden hierbei Oberflächen nicht abgegossen, sondern ein Prägestempel als Negativ eingesetzt. Mit diesem Stempel wird verformbares Material geprägt. Nach der Prägung härtet das Material aus, übrig bleibt eine strukturierte Oberfläche. Über diese Methode lassen sich heutzutage selbst Nanostrukturen schaffen, die je nach Material auch superhydrophobe Eigenschaften besitzen können (Lee *et al.*, 2004; Lee & Kwon, 2006). Eine durch Kapillarkräfte getriebene Prägung von Polymeren zur Erzeugung doppelstrukturierter superhydrophober Oberflächen stellen Jeong *et al.* (2006) vor.

Silica **Aerogele** basierend auf Methyltrimethoxysilanen erzielen nach dem Aushärten Kontaktwinkel von ca. 173° . Die Unbenetzbarkeit kann in Abhängigkeit der Konzentrationen der einzelnen chemischen Komponenten variiert werden. Die Gele sind gleichzeitig bis zu einer Temperatur von $\sim 480^\circ \text{C}$ stabil und eröffnen damit einen weiten Einsatzbereich (Rao *et al.*, 2003, 2004). Über weitere superhydrophobe Aerogele berichten Roig *et al.* (2004) und Yamanaka *et al.* (2006).

Sol-Gel Verfahren stellen eine weitere Methode dar, wie Oberflächenstrukturen in einem Selbstorganisationsprozess erzeugt werden können. Dabei handelt es sich um ein nass-chemisches Verfahren zur Herstellung keramischer oder keramisch-organischer Werkstoffe. Je nach verwendetem Material erzielt man auf diese Weise extrem unbenetzbare Oberflächen (Han *et al.*, 2004). Ebenfalls über einen Sol-Gel-Prozess stellten Xu *et al.* (2003), Shirtcliffe *et al.* (2005b), Li *et al.* (2006b), Liu *et al.* (2006b) und Tadanaga *et al.* (2000a) unbenetzbare Oberflächen her. Ein Übersichtsartikel zu dem Thema funktionale Oberflächen mittels Sol-Gel Verfahren mit einem Abschnitt zur Superhydrophobie findet sich bei Pagliaro & Ciriminna (2005).

Eine sehr einfache Methode der Strukturierung von Oberflächen stellen **selbstorganisierende partikuläre Beschichtungen** dar (Habets, 2003; Han *et al.*, 2005a, 2005b; Ferrari *et al.*, 2006). Nanosiliziumpartikel zur Herstellung superhydrophober Oberflächen verwendeten beispielsweise Klein *et al.* (2003) und Li *et al.* (2006a). Selbstorganisierende sphärische Partikel aus den Materialien CaCO_3 , Kieselerde oder Polystyren nutzten Zhang *et al.* (2005a), um mehrfach strukturierte unbenetzbare Oberflächen herzustellen. Doppelstrukturierte Oberflächen erzeugten Ming *et al.*

(2005) mit Hilfe von „himbeerähnlichen“ Partikeln. Dabei werden gröbere Partikel, beladen mit feineren hydrophoben Partikeln auf Oberflächen eingebettet, wodurch eine superhydrophobe Oberfläche entsteht. Eine chemisch besonders stabile partikuläre Beschichtung erzeugten Wang *et al.* (2006b).

Mittels **Laser** schafften Baldacchini *et al.* (2006), Wagterveld *et al.* (2006), Zorba *et al.* (2006) und McLauchlin *et al.* (2007) strukturierte Oberflächen, die nach einer zusätzlichen Hydrophobierung unbenetzbar werden.

Selbst bei sonst saugenden Oberflächen, wie Filterpapier ist heutzutage nach entsprechender Behandlung eine Unbenetzbarkeit erzielbar (Nyström *et al.*, 2006).

Weiterführende Untersuchungen an superhydrophoben Oberflächen

Die außerordentlich antiadhäsiven Eigenschaften von superhydrophoben Oberflächen eröffnen nicht nur die Möglichkeit innovativer Einsatzfelder. Es regt auch zur Untersuchung weiterer damit verbundener Phänomene an. Beispielsweise können die Geschwindigkeit und das Roll- oder Rutschverhalten von Tropfen auf solchen Oberflächen betrachtet werden (Mahadevan & Pomeau, 1999; Sakai *et al.*, 2006). Dabei erstaunt die Tatsache, dass der rollende Tropfen umso schneller ist, je kleiner er ist (Richard & Quéré, 1999). Auch das Springverhalten von Tropfen auf superhydrophoben Oberflächen offenbart Erstaunliches. So ändert beispielsweise ein Tropfen beim Aufprall seine Form in eine stufige Pyramide (Renardy *et al.*, 2003). Für kleine Tropfen kann die kinetische Energie in der Oberflächenspannung gespeichert werden, so dass ein vollständiges Zurückspringen von der Oberfläche beobachtet werden kann. Dabei erreicht der Tropfen bis zu 90% seiner ursprünglichen Fallhöhe, was einem außerordentlich elastischen Verhalten entspricht (Richard & Quéré, 2000; Rioboo *et al.*, 2001). Auch ist bei kleinen Tropfen die Kontaktzeit zwischen dem Aufprall und dem Zurückspringen von einer superhydrophoben Oberfläche überraschenderweise unabhängig von der Fallgeschwindigkeit. Dies spricht gegen die bisherige Annahme, dass die Viskosität eine Rolle dabei spielt. Richard *et al.* (2002) maßen für Fallgeschwindigkeiten von 20-230 cm s⁻¹ immer die gleiche Kontaktzeit von ca. 3,5 ms. Die Kontaktzeit ändert sich jedoch linear mit der Größe der Tropfen. Weitere Arbeiten zu diesem Thema finden sich beispielsweise bei Rioboo *et al.* (2001), Clanet *et al.* (2004), oder Bartolo *et al.* (2006).

Ein Arbeitsgebiet, das in den letzten Jahren immer mehr Aufmerksamkeit gewonnen hat, umfasst die Kontrolle der Superhydrophobie. Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit

der An- und Ausschaltung der Superhydrophobie über verschiedene Parameter, wie beispielsweise Licht, Elektrizität, Temperatur, Elastizität und pH-Wert (Bahadur & Garimella, 2007; Feng *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2004b; Krupenkin *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2004; Motornov *et al.*, 2002; Nitschke *et al.*, 2002; Rosario *et al.*, 2004; Shi *et al.*, 2007; Shirtcliffe *et al.*, 2005b; Song *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2004; Tadanaga *et al.*, 2000b; Uchida *et al.*, 2006; Xia *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2005a; Zhang *et al.*, 2005b; Zhang *et al.*, 2006d; Zhu *et al.*, 2006a). Für solche Oberflächen, die bei Bedarf benetzbar oder unbenetzbar werden, erwartet man Einsatzbereiche hauptsächlich in der Mikrosystemtechnik bei Lab-on-chip Anwendungen. Ebenfalls im Zusammenhang mit Lab-on-chip Anwendungen beschäftigt man sich mit der elektrostatischen (Torkkeli *et al.*, 2000) oder magnetischen (Guo *et al.*, 2006a) Manipulation von Tropfen auf unbenetzbaren Oberflächen.

Auch die Frage, ob Reibung von Flüssigkeiten an superhydrophoben Oberflächen reduziert werden kann, beschäftigt zunehmend mehr Wissenschaftler (Cottin-Bizonne *et al.*, 2003). Kim & Kim (2002) konnten zeigen, dass der Fließwiderstand einer nanostrukturierten, unbenetzbaren Oberfläche gegenüber einer glatten um bis zu 99% verringert ist. Weitere Arbeiten bestätigen die Reduktion der Reibung von Flüssigkeiten bei Einsatz von superhydrophoben Oberflächen, wenn auch nicht immer mit derart extremen Auswirkungen (Balasubramanian *et al.*, 2004; Benzi *et al.*, 2006; Fukuda *et al.*, 2000; Gogte *et al.*, 2005; Henschel *et al.*, 2006; Joseph *et al.*, 2006; Ou *et al.*, 2004; Ou & Rothstein, 2005a, b; Watanabe *et al.*, 1999; Watanabe, 2000). Die Bedeutung dieser Arbeiten nimmt im Hinblick auf die zahlreichen Einsatzmöglichkeiten immer mehr zu (Choi & Kim, 2006; Fukagata *et al.*, 2006; Genzer & Efimenko, 2006; Granick *et al.*, 2003; Kassner *et al.*, 2003; Marmur, 2006a, b; Salamon *et al.*, 2005; Voronov *et al.*, 2006). Eine erste technisch realisierte Anwendung findet sich in der Schifffahrt (Tokunaga *et al.*, 1993; Tokunaga *et al.*, 1994).

Weitere Publikationen über superhydrophobe Oberflächen beschäftigen sich mit optischen Anwendungen (Kwong *et al.*, 2004), mit Fragestellungen zur Adhäsion (Burton & Bhushan, 2005; Jin *et al.*, 2005; Kako *et al.*, 2004; Khorasani & Mirzadeh, 2004), mit dem Einfluss von Tensiden (Mohammadi *et al.*, 2004), dem Verhalten von Wasser am Siedepunkt (Takata *et al.*, 2005) oder mit der Tropfenmanipulation (Shastri *et al.*, 2005, 2006; Torkkeli, 2003). Auch über die Verwendung von superhydrophoben Oberflächen im Weltraum wird nachgedacht (Rogers *et al.*, 2005).

Anwendung superhydrophober Oberflächen in der Technik

Im Jahr 2005 präsentierten Lifton & Simon (2005) einen innovativen Aufbau für eine Batterie, die als wichtigstes Bauteil eine superhydrophobe Zink-Oberfläche als negative Elektrode besitzt. Durch Ausnutzung eines Phänomens, dem so genannten „Electrowetting“, wird bei Strombedarf eine höhere Benetzung der Strukturen mit dem Elektrolyten erreicht, wodurch die Batterie Strom generiert. Die Integration der superhydrophoben Oberfläche ermöglicht im inaktiven Zustand der Batterie extrem lange Lebensdauer, da aufgrund der Unbenetzbarkeit eine physikalische Trennung zwischen der Elektrode und dem Elektrolyten vorliegt.

Eine Methode wie über superhydrophobe Oberflächen Wasser von Öl getrennt werden kann, präsentieren Zhang *et al.* (2006a). Ihre Oberfläche ist zwar wasserabweisend, jedoch gleichzeitig superoleophil. Unter Druck lässt sich mit der Oberfläche als Filter die Auftrennung bewerkstelligen.

Eis abweisende Beschichtungen sind über superhydrophobe Oberflächen ebenfalls möglich. Ihre Anwendungen liegen besonders bei Radio- und Telekommunikationsgeräten wie Antennen und Satellitenschüsseln. Einen entsprechenden Lack auf PTFE-Partikel Basis wird von Saito *et al.* (1997) präsentiert. Dieser Lack ist unter dem Namen „Hirec“ von der NTT Company aus Japan bereits auf dem Markt erhältlich.

In der Schifffahrt werden superhydrophobe Oberflächen zur Reduktion der Wandreibung eingesetzt (Tokunaga *et al.*, 1993).

Ein weiteres Einsatzgebiet superhydrophober Oberflächen liegt im Bereich des Transports und der Aufbewahrung von Dispersionen Keller *et al.* (2002).

Anwendung von superhydrophoben Oberflächen auf Elektroden für einen hoch empfindlichen Nachweis von Schwermetallen präsentierten Yanagimachi *et al.* (2005).

Fujii & Hirayama (1999) verwendeten superhydrophobe Oberfläche um im Kristallisationsprozess Makromoleküle zu züchten, da dies mit gewöhnlichen Oberflächen nicht gelingt.

Eine Anwendung superhydrophober Oberflächen bei Brennstoffzellen stellte Extrand (2005) vor.

3.1 Extrem unbenetzbare Oberflächen in der Natur

Das Phänomen der Unbenetzbarkeit wurde bereits sehr früh in der Natur beobachtet. So schrieb beispielsweise Goethe in seinem Werk „Verstäubung, Verdunstung,

Vertropfung“ (In: Zur Morphologie; 1817-1822, Erster Band, S. 210-221): „Regentropfen bleiben auf gewissen Blättern kugelrund und klar stehen, ohne zu zerfließen, welches wir wohl billig irgend einem ausgedünsteten Wesen zuschreiben können“. Systematische Untersuchungen dieses Phänomens begannen aber erst Mitte des 20. Jahrhunderts. Während Kerner von Marilaun (1913) noch eher poetisch die Unbenetzbarkeit einiger Pflanzen beschrieb, publizierten Ziegenspeck (1942) und Fogg (1947, 1948) bereits genauere Untersuchungen zur physikalischen Chemie unbenetzbarer Blätter und über mögliche Faktoren, die sich auf die Benetzung auswirken. Im gleichen Zeitraum wurden intensive Untersuchungen der unbenetzbaren Oberflächen bei tauchenden Insekten von Crisp (1963, 1964), Crisp & Thorpe (1948), Thorpe & Crisp (1947a, b, c; 1949) und Hinton (1976) durchgeführt, die sich mit einer speziellen Form der Atmung unter Wasser, der Plastronatmung, beschäftigten. Adam (1958; 1963) und Crisp (1963) fassten den damaligen Wissensstand über wasserabweisende Oberflächen in der Tier- und Pflanzenwelt zusammen.

Gut untersucht sind unbenetzbare Oberflächen bei tauchenden oder schwimmenden Spinnen (Rovner, 1986; Stratton *et al.*, 2004; Suter, 1999; Suter & Gruenwlad, 2000; Suter *et al.*, 2004). Über die Unbenetzbarkeit bei Säugern (Appelt, 1973; Hutterer & Hürter, 1981; Köhler, 1991) und Vögeln (Burt & Ichida, 2006; Haffer, 1985; Rijke, 1970; Rutschke, 1960) existieren ebenfalls zahlreiche Publikationen. Bei Insekten spielt die extreme Unbenetzbarkeit eine wichtige Rolle (Holdgate, 1955). Superhydrophobe Oberflächen ermöglichen zahlreichen Fluginsekten eine Abreinigung von gewichtsbelastenden Schmutzpartikeln und verhindern bei Feuchtigkeit eine Benetzung der Flügel (Chen *et al.*, 2004; Cong *et al.*, 2004; Wagner *et al.*, 1996; Zheng *et al.*, 2007). Eine Kopplung von Strukturfarben und Unbenetzbarkeit nach dem Vorbild der Flügel eines Schmetterlings (*Morpho sulkowskyi*) ist technisch bereits gelungen (Gu *et al.*, 2003).

Pike *et al.* (2002) zeigten, wie es Blattläuse mit Hilfe der Unbenetzbarkeit schaffen, in pflanzlichen Gallen zu überleben und den von ihnen ausgeschiedenen Honigtau zu transportieren, ohne selbst dabei zu benetzen. Parker & Lawrence (2001) untersuchten wassersammelnde Käfer, die in Wüsten leben. Auf ihren Elytren befinden sich superhydrophobe Kanäle, die mit hydrophilen Domänen gekoppelt sind. Mit dieser Oberfläche vermögen sie aus Nebel Wassertröpfchen aufzufangen (hydrophile Areale) und diese zum Mund zu transportieren (hydrophobe Areale). Diese Oberflächen

nahmen Wissenschaftler zum Vorbild und entwickelten nach diesen Strukturprinzipien entsprechende technische Oberflächen (Garrod *et al.*, 2007; Zhai *et al.*, 2006).

Ein weiterer Vorteil extremer Unbenetzbarkeit in der Tierwelt liegt in der Fortbewegung über Wasser (Feng *et al.*, 2007). Eine ausführliche Zusammenfassung zu diesem Thema findet sich bei Bush & Hu (2006).

Innerhalb der Ektomycorrhizza wurde ebenfalls extreme Unbenetzbarkeit beobachtet. Diese Pilze nutzen die Superhydrophobie als Schutz vor Nässe und vermögen auf diese Weise die Belüftung des Bodens zu kontrollieren (Unestam, 1991).

Umfassende Arbeiten über das Benetzungsverhalten von Blättern verfasste Holloway (Holloway, 1969a, b, 1970, 1971). Der Autor stellte die Bedeutung und den Zusammenhang zwischen der Feinstruktur und der Chemie der epikutikularen Wachse für die Unbenetzbarkeit der Blätter dar. Weiterführende Untersuchungen zur Unbenetzbarkeit von Blättern führten Hartley & Brunskill (1958) durch. Die Autoren zeigten erste Ergebnisse zur Bedeutung der zwischen den Strukturen eingeschlossenen Luft, indem sie bei Unterdruck Tropfen auf Blätter fallen ließen. Die Bedeutung von Blatttrichomen für die Unbenetzbarkeit (Brewer & Smith, 1997) und der damit verbundenen Fokussierung von Licht durch die aufliegenden Tropfen untersuchten Brewer *et al.* (1991). Weitere Arbeiten über die Unbenetzbarkeit pflanzlicher Blätter und ihrer Veränderung in Abhängigkeit verschiedener Faktoren wie dem Alter, Nährstoffen, Verschmutzungen, Pilzbewuchs, Abrasion und Verwitterung finden sich bei Linskens (1950, 1952) Adam (1958, 1963) Rentschler (1971), Haines *et al.* (1985) und Hall & Burke (1974). Die Benetzbarkeit von Blättern beschäftigt auch weiterhin viele Wissenschaftler, besonders in Hinblick auf ihr Vorkommen bei Nutzpflanzen (bsp. Pandey & Nagar, 2003), der Aufnahme von Stoffen wie Herbiziden oder Düngemitteln über die Blattoberfläche (bsp. Baker *et al.*, 1983; Bukovac *et al.*, 1975, 1997; Klein, 2000; Neinhuis *et al.*, 1992; Spillmann, 1984; Watanabe & Yamaguchi, 1991, 1993; Zabkiewicz *et al.*, 1988) oder allgemein im ökophysiologischen Zusammenhang (bsp. Pierce *et al.*, 2001; Smith & McClean, 1989). In den letzten Jahren hat die Untersuchung der physiko-chemischen Grundlagen der extremen Unbenetzbarkeit pflanzlicher Oberflächen stark zugenommen. Besonders Physiker und Materialwissenschaftler interessieren sich für die optimierten Oberflächen, um mehr über diese Eigenschaften herauszufinden (Bhushan & Jung, 2006; Nosonovsky & Bhushan, 2005a; Otten & Herminghaus, 2004; Wagner *et al.*, 2004).

3.2 Selbstreinigende superhydrophobe Oberflächen

Trotz der großen und stetig steigenden Bedeutung superhydrophober Oberflächen beschäftigen sich bislang nur sehr wenige Arbeiten mit einer weiteren Eigenschaft dieser Oberflächen (Parkin & Palgrave, 2004). Viele superhydrophobe Oberflächen sind zugleich selbstreinigend. Die stark strukturierten Oberflächen reduzieren nicht nur die mögliche Kontaktfläche zu Wasser, sondern auch zu partikulären Verschmutzungen. Nur an wenigen Strukturerhebungen können Partikel mit der Oberfläche in Kontakt treten. An diesen Stellen wirken hauptsächlich die verhältnismäßig schwachen van der Waals-Kräfte zwischen Oberfläche und Partikel (bsp. Bowling, 1988; Chow, 2003, 2007; Rumpf, 1974; Schubert, 1979). Rollt nun ein Tropfen über eine solche Oberfläche und kommt mit dem Partikel in Kontakt, treten die viel stärkeren Kapillarkräfte auf (Pitois & Chateau, 2002). In Folge kommt es zu einer irreversiblen Anheftung des Partikels an den Wassertropfen. Ein Umstand, den sich Forscher zu Nutze machen, um „liquid marbles“ zu untersuchen (Aussillous & Quéré, 2001; Aussillous & Quéré, 2004; Mahadevan, 2001; McHale *et al.*, 2006; Quéré & Aussillous, 2002). Je nach Benetzungsgrad haftet der Partikel entweder an der Oberfläche des Tropfens oder wird in ihn hineingezogen (Krasovitski & Marmur, 2005; Schubert, 1969). Ein Zusammenhang zwischen Unbenetzbarkeit und Selbstreinigung wurde bereits früh von Lundström (1884) vermutet. Weitere Autoren geben meist beschreibend diesen Zusammenhang wieder (Günther & Wortmann, 1966; Rentschler, 1971). Auch im Bereich der Phytopathologie existierten frühe Beobachtungen, die unbenetzbare Blätter mit einer Abnahme der Pilzinfektionen in Verbindung bringen (Martin, 1964; Wingard, 1941). Weitere indirekte Beobachtungen machten Turunen & Huttunen (1990), die bei Veränderung der Wachse eine stärkere Verschmutzung von Pflanzen beobachteten. Netzmittel, die die Wachse schädigen, haben ähnliche Auswirkungen (Lownds & Bukovac, 1988; Noga *et al.*, 1987; Wolter *et al.*, 1988; Wortmann, 1965). Den direkten Zusammenhang zwischen Unbenetzbarkeit und Unverschmutzbarkeit pflanzlicher Oberflächen bewiesen erstmals Barthlott & Neinhuis (1977). Sie schlugen auch die Selbstreinigung als Hauptfunktion epikutikularer Wachse bei pflanzlichen Oberflächen vor. Die Effizienz dieser Selbstreinigung wurde in den folgenden Jahren eingehend untersucht und belegt (Barthlott, 1990; Barthlott & Wollenweber, 1981). Für einige Pflanzen wie beispielsweise die Eiche (*Quercus robur*) konnte nachgewiesen werden, dass die Wachserosion mit einer zunehmenden Verschmutzung einhergeht (Neinhuis & Barthlott, 1998). Eine systematische Untersuchung der selbstreinigenden Eigenschaften

verschiedener Arten belegte die extrem hohe Effizienz der Abreinigung von Schmutzpartikeln (Barthlott & Neinhuis, 1997). Blätter mit Kontaktwinkeln $>140^\circ$ zeigten nach einem Gewitterregen eine Restkontamination $<10\%$, wohingegen auf Blättern mit Kontaktwinkeln $<120^\circ$ eine beträchtliche Menge an Restkontaminantien nachgewiesen wurde. Bei doppelstrukturierten Oberflächen, wie den Blättern von *N. nucifera*, ist für die Reinigung eine kinetische Energie der Tropfen notwendig. Feiner Nebel vermag solche Oberflächen nicht zu reinigen, da die Nebeltropfen die Schmutzpartikel zwischen den Papillen nicht erreichen und damit eine Restverschmutzung bleibt. Bei Pflanzen, die verhältnismäßig glatte oder nur leicht konvexe Zellen mit Wachskristallen besitzen, reicht dagegen Nebel aus, um nahezu alle Schmutzpartikel abzureinigen. Bislang konnte die Effizienz der Selbstreinigung hauptsächlich für abiotischen Verschmutzungen belegt werden (Barthlott & Neinhuis, 1997; Fürstner *et al.*, 2005; Neinhuis & Barthlott, 1997), ein Nachweis über ihre Wirkkraft bei der Abwehr von obligat biotrophen Pathogenen blieb dagegen bislang aus, obwohl die Vermutung nahe liegt, dass diese Eigenschaft besonders zur Abwehr von Mikroorganismen in der Natur evolviert wurde (Barthlott & Neinhuis, 1997). Einige wenige Untersuchungen lassen einen Zusammenhang zwischen Selbstreinigung und Befall von Pflanzen erkennen, jedoch wurde in diesen Fällen auf Pilze zurückgegriffen, die überwiegend senescente oder geschwächte Blätter befallen (Neinhuis *et al.*, 1992; Noga *et al.*, 1990), wodurch ein Rückschluss über die Effizienz der Selbstreinigung in diesem Zusammenhang schwierig ist.

Dass die Selbstreinigung auf rein physiko-chemischen Grundlagen beruht, konnten Barthlott & Neinhuis (1997) mit Hilfe erster technischer Oberflächen zeigen. Den Autoren gelang es, Teflonpartikel mit Klebstoff an Kunststoffplatten zu heften und auf diese Weise unbenetzbare und selbst mit Ruß nicht verschmutzbare Oberflächen herzustellen (Cerman *et al.*, 2004). Die Herstellung solcher selbstreinigender Oberflächen wurde in Folge patentiert (Barthlott, 1998; Barthlott & Neinhuis, 2000). Inzwischen ist es gelungen selbstreinigende superhydrophobe Eigenschaften auf eine Vielzahl von Materialien erfolgreich zu übertragen. Die Selbstreinigung lässt sich heutzutage beispielsweise bei Lacken (Baumann *et al.*, 2002; Ming *et al.*, 2005; Wulf *et al.*, 2002), Kunststoffen (Nun *et al.*, 2002; Schleich & Peters, 2002), Dachziegeln (Dendl & Interwies, 2001) und Textilien (Barthlott & Neinhuis, 2001; Höcker, 2002) realisieren. Bei Fassadenfarben (Born *et al.*, 2000; Born *et al.*, 1999; Magner & Diehl, 1999), Sprays

für temporäre Anwendungen (Müller & Winter, 2004) und Gläsern (Baumann *et al.*, 2003) ist sogar bereits die Marktreife erreicht worden.

Inzwischen existieren zahlreiche Patente, die superhydrophobe und selbstreinigende Oberflächen zum Gegenstand haben (bsp. Baltus, 1999; Baumann *et al.*, 2001; Büchsel *et al.*, 2002; Diehl, 2000; Dirauf *et al.*, 2001; Engel *et al.*, 2001; Finkenauer & Herder, 2000; Fischer, 2000; Gros, 2001; Groß *et al.*, 1999; Hölter & Eichmeier, 1999a, b; Kaltenegger & Kiefer, 1999; Nun & Oles, 2001; Nun *et al.*, 2001; Oles *et al.*, 2001a, b; Oost & Domschke, 2001; Rexroth Mecman GmbH, 2002; Schmid *et al.*, 2003; Wagner & Friesen, 2001; Weissbarth, 1999).

Dem Zusammenhang zwischen selbstreinigenden Eigenschaften und den Benetzungszuständen von Oberflächen (Cassie- und Wenzel-Zustand) widmet sich die Arbeit von Fürstner *et al.* (2005). Erstmals wird für drei Typen technischer Oberflächen die Effizienz der selbstreinigenden Eigenschaften in Abhängigkeit der Strukturen und simulierten Regenereignissen untersucht. Beim Wenzel-Zustand geht den Untersuchungen zur Folge die Selbstreinigung der Oberflächen verloren.

Während die Erkenntnisse über die Unbenetzbarkeit von Oberflächen stetig wachsen, sind bislang nur wenige Arbeiten zum Thema Selbstreinigung verfasst worden. Ungeklärt sind beispielsweise Fragen nach der Effizienz der Selbstreinigung in Abhängigkeit der Schmutzpartikel. Die Arbeiten von Barthlott & Neinhuis (1997) und Neinhuis & Barthlott (1998) lassen vermuten, dass ein solcher Zusammenhang zwischen der Korngröße der Partikel und der Selbstreinigung besteht.

In Zukunft müssen beispielsweise noch Fragen zur Abhängigkeit der Selbstreinigung von vorliegenden Strukturgeometrien geklärt werden. Ebenso ist die Frage nach der Art des Schmutzes, der mit Wasser von solchen Oberflächen noch abgereinigt werden kann, noch offen.

4. Modellsystem Weizen und Mehltau: Auswirkung von Niederschlägen auf den Befall unter Laborbedingungen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen sollen die Frage beantworten, unter welchen Umständen selbstreinigende pflanzliche Oberflächen von pathogenen Pilzen befallen werden. In bisherigen Untersuchungen zur Effizienz der Selbstreinigung wurde hauptsächlich mit dem saprophytischen Pilz *Botrytis cinerea* gearbeitet (Neinhuis *et al.*, 1992; Schwab *et al.*, 1995), welcher generell eher geschwächte Pflanzen oder ältere Pflanzenorgane angreift (Blakeman, 1980; Dickinson, 1967; Köhl & Fokkema, 1994). Die Versuche zeigten eine hoch effiziente Abwehr des Pilzes bei intakter und funktionierender Selbstreinigung (Barthlott & Neinhuis, 1997; Neinhuis *et al.*, 1992). Dennoch existieren viele Pflanzen mit unbenetzbaren und selbstreinigenden Oberflächen, die von Pilzen befallen werden. Bei Saatweizen (*Triticum aestivum*) beispielsweise ruft der Getreidemehltau, verursacht durch den Pilz *Blumeria graminis*, weltweit Ernteaufälle in Milliardenhöhe hervor (Agrios, 1997). Dabei sind die Blätter von Saatweizen von feinen dreidimensionalen epikutikularen Wachskristallen des Wachstyps „Schuppen“ vollständig überzogen (Koch *et al.*, 2006b), die letztlich extrem unbenetzbare Eigenschaften hervorrufen (Troughton & Hall, 1967). Es ist davon auszugehen, dass die Blätter von Weizen auch über selbstreinigende Eigenschaften verfügen, wenn auch bis heute der Beweis dafür noch ausgeblieben ist.

In der vorliegenden Untersuchung wird zunächst die Unbenetzbarkeit von drei Weizensorten „Kris“, „Kanzler“ und „Ludwig“ untersucht und anschließend deren Selbstreinigungsfähigkeit mittels eines standardisierten Tests überprüft. Im zweiten Teil des Versuchs soll festgestellt werden, wie effektiv die selbstreinigenden Eigenschaften der Blätter von *T. aestivum* vor dem Befall mit *B. graminis* schützen. Dafür wurden in diesem Versuch Weizenblätter gleichen Alters gezielt in einer Verstäubungskammer einer hohen Konzentration *Blumeria*-Konidien exponiert. Anschließend wurden diese Blätter je nach Versuchsreihe nach einer, zwei bzw. drei Stunden einem Niederschlag ausgesetzt und danach sowohl die Anzahl der Konidien, wie auch deren Keimung auf den Oberflächen im REM ermittelt. Die Niederschlagsereignisse waren zu einem feinen Nebel, der nur eine geringe kinetische Energie besitzt und ein simulierter Regen. Da vorrangig die dreidimensionale Struktur der epikutikularen Wachskristalle für die unbenetzbaren Eigenschaften und damit für die mögliche Selbstreinigung verantwortlich

ist, wurden zu Vergleichszwecken bei einigen Blattproben die Wachskristalle flächig zerstört. Auf diese Weise konnte die Auswirkung von Fehlstellen (höhere Benetzbarkeit, geringe Selbstreinigungswirkung) auf die Belegung mit Konidien sowie das Keimverhalten untersucht werden. Die drei Intervalle zwischen der Inokulation und den Niederschlägen ermöglicht zudem eine Einschätzung, inwieweit die Zeit eine Rolle bei dem Befall mit *B. graminis* spielt.

4.1 Wirt-Pathogen-Beziehungen zwischen Pflanzen und Pilzen

Die Organismengruppe der Pilze umfasst etwa 75.000 bislang beschriebene Arten. Eine aktuelle taxonomische Einteilung der Pilze nach molekularbiologischen Erkenntnissen findet sich bei Deacon (2006) und Lutzoni *et al.* (2004).

Pilze sind heterotroph und besitzen kein Chlorophyll. Sie sind gekennzeichnet durch einen echten meist haploiden Zellkern (eukaryotisch) und wachsen typischerweise in Form von Filamenten, Hyphen genannt, die im Gegensatz zu anderen filamentös wachsenden Mikroorganismen (bsp. Algen) ein apikales Wachstum aufweisen. Aufgrund ihrer heterotrophen Lebensweise (chemo-organotroph) benötigen Pilze organische Nährstoffe als Energiequelle. Sie können sich sexuell oder asexuell vermehren und verbreiten sich über Sporen (Deacon, 2006). Sporen die außerhalb der Mutterzelle entstehen, werden Exosporen oder Konidien genannt. Gute Übersichten über die Ökologie und Physiologie der Pilze liefern beispielsweise Ingold & Hudson (1993) und Dix & Webster (1995).

Pflanzliche Oberflächen dienen vielen Mikroorganismen als Habitat. Verursachen sie bei Pflanzen Krankheiten werden sie allgemein als Phytopathogene bezeichnet (Deacon, 2006). In der Ordnung Peronosporales (Oomycota) finden sich für Pflanzen wichtige Krankheitserreger wie der Falsche Mehltau (Peronosporaceae) und die Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel. Aus der Abteilung Eumycota sind aus den Klassen Ascomycetes (Schlauchpilze) und Basidiomycetes (Ständerpilze) zahlreiche epiphytische und auch pflanzenpathogene Pilzarten bekannt, wie der echte Mehltau (Erysiphales) oder, bei den Basidiomycetes, die Rostpilze (Uredinales).

Blätter stellen ein gutes Substrat für Pilze dar (Dickinson, 1976). Die Transpiration der Blätter verhindert starke Schwankungen der Luftfeuchtigkeit und Nährstoffe können durch Diffusion oder *Leaching* an die Blattoberfläche gelangen. Limitierende Faktoren für die Besiedlung stellen wiederum die mit der Exposition verbundene hohe UV-Strahlung und Temperaturschwankungen dar (Pugh & Buckley, 1971).

Nach Freisetzung von Pilzsporen (Stakman & Harrar, 1957a) folgt die Verbreitung, die anemochor (durch Wind), hydrochor (durch Wasser), zoochor (durch Tiere) oder antropochor (durch Menschen) erfolgen kann (Carlile & Watkinson, 1994; Schwates, 1996; Stakman & Harrar, 1957b). Vor allem über den Luftraum werden Konidien über weite Strecken verbreitet (Aylor, 1978). Sie gelangen dann entweder über den Regen oder über Sedimentation auf die Blattoberflächen (Davies, 1961; Grace & Collins, 1976; Hirst & Stedman, 1963; Madden, 1992). Gregory (1971, 1973) beschreibt manche Blätter als „Sporenfallen“ („spore traps“), da Haare oder andere Strukturen die Sporen abfangen, bevor sie die Blattoberfläche erreichen. Bei der Landung spielen nach Forster (1977) und Allen *et al.* (1991) auch die epikutikularen Wachse eine Rolle.

Nach der Landung auf einem Blatt finden vielfältige Interaktionen zwischen Pilz und Blatt statt. Je nach Pilzart können manche Pilze nur auf gesunden Pflanzen wachsen, ein weiterer Teil kann nur auf seneszenten (alternden oder gestressten Pflanzen) gedeihen (Dickinson, 1976).

Nur circa 8.000 Arten sind als Pflanzenpathogene bekannt und rufen bei einer oder mehreren Pflanzen Krankheiten hervor (Schäfer, 1994). Die Phytopathogene werden je nach Ernährungsweise vereinfacht in nekrotrophe, biotrophe und hemibiotrophe Pathogene eingeteilt. Nekrotrophe Pilze töten das befallene Gewebe direkt oder durch Toxine ab und ernähren sich von der abgestorbenen Material. Biotrophe Pathogene wiederum ernähren sich vom lebenden Gewebe. Sie bilden dafür spezialisierte Strukturen aus. Hemibiotrophe Pathogene wachsen anfänglich als Biotrophe, führen später jedoch zum Absterben des Gewebes, von dem sie sich anschließend noch weiter ernähren (Deacon, 2006).

Krankheitsverläufe verursacht durch Pilze laufen stets nach einem ähnlichen Muster ab. Zunächst erfolgen Verbreitung, Landung und Erkennung der Oberfläche. Anschließend finden Keimung, Penetration, Infektion, Wachstum und Reproduktion statt (Agrios, 1997). Diese letzten Schritte können auch in einer leicht abgeänderten Reihenfolge ablaufen. Eine erfolgreiche Infektion des Blattes beginnt mit der Adhäsion. Sie ist notwendig, um die Spore nach der Landung vor Abtrag durch Wind und Regen zu schützen (Nicholson & Epstein, 1991). Um eine hohe Adhäsion auf der Oberfläche zu erreichen, wird bereits kurz nach der Landung mit der Produktion von extrazellulären Substanzen (EPS) begonnen (Nicholson, 1996). Über die spezifische Zusammensetzung des extrazellulären Materials ist nur wenig bekannt, es scheint aber meist Glycoproteine (Nicholson, 1996) oder Polysaccharide zu enthalten (Nicholson & Epstein, 1991).

Inzwischen ist die Erkenntnis gesichert, dass bei vielen Arten die EPS auch Enzyme enthalten, die Wachse oder die Kutikula zersetzen (Kolattukudy, 1985). Eine Adhäsion erfolgt auch über spezifische Haftorgane, die Appressorien (Tucker & Talbot, 2001). Diese übernehmen auch weitere Funktionen wie Penetration der Kutikula und Überwindung des osmotischen Gegendrucks (Schwates, 1996).

Für die Keimung benötigen die meisten Pilzsporen auf der Oberfläche frei verfügbares Wasser (Stott, 1971) und das meist über längere Dauer (Schwates, 1996). Eine Infektion muss trotz des richtigen Wirts und günstigen Keimungsbedingungen nicht zwangsläufig erfolgen. Zunächst muss eine so genannte numerische Infektionsschwelle erreicht sein. Um zum Beispiel bei reifen unverletzten Weinbeeren eine Infektion mit *Botrytis cinerea* hervorzurufen, werden zwischen 2000 und 3000 Konidien benötigt, während in der Gruppe der Echten Mehltaupilze nur eine einzige Konidie für eine Primärinfektion ausreicht (Schwates, 1996).

Nach einer erfolgreichen Adhäsion entwickeln die Pilzsporen Hyphen, die zum Teil der Adhäsion, aber auch der Infektion dienen. Die Bildung der Hyphen wird durch verschiedene Signale beeinflusst und gesteuert (Hoch & Staples, 1991). Chemische und topographische Begebenheiten der Oberflächen, ebenso wie auch Wasser oder Temperatur haben einen Einfluss auf Pflanzenpathogene. Chemo-, Thigmo- und Hydrotropismen beschrieben Wynn (1981) und Hoch & Staples (1991).

Eine Infektion kann entweder über Wunden oder über Spaltöffnungen erfolgen, außerdem nach Ausbildung eines Appressoriums (Dean, 1997) auf der Epidermis oder Rhizodermis mit Hilfe eines Penetrationskeils, der die Kutikula und/oder die Zellwand durchdringt (Howard, 1997; Köller, 1991; Mendgen *et al.*, 1996). Die direkte Penetration erfolgt über Infektionshyphen, auch „penetration pegs“ genannt (Agrios, 1997). Die Penetration erfolgt dabei sowohl mechanisch als auch enzymatisch und ist mit einem hohen Kraftaufwand verbunden (Kolattukudy, 1985).

Mehltau bildet ein Mycelium an der Oberfläche der Blätter aus und nur die Haustorien dringen ins Zellinnere vor. Die meisten jedoch verbreiten sich in alle pflanzlichen Organe und bilden entweder inter- oder intrazelluläre Mycelien (Schäfer, 1994). Eine allgemeine Übersicht über den Krankheitsverlauf verschiedener Pilze findet sich beispielsweise bei Deacon (2006).

Nach Agrios (1997) wird nahezu jede Pflanzenart von ungefähr 100 verschiedenen Pathogenen (Pilzen, Bakterien, Viren oder Nematoden) angegriffen. In Jahrmillionen entwickelten die Pflanzen daher entsprechende Abwehrmechanismen, die aus einer

Kombination von physikalischen und chemischen Maßnahmen bestehen. Die wichtigste Abwehr erfolgt über die vielfältigen sekundären Pflanzeninhaltsstoffe, die sogenannten Phytoanticipine und Phytoalexine (Deacon, 2006). Als chemische Abwehr bestehen sie aus Gerbstoffen, Glykosiden, phenolischen Verbindungen oder Saponinen. Diese können vor oder nach einer Infektion gebildet werden. Als weiteren Schutzmechanismus bilden viele Pflanzen eine dicke Kutikula als physikalische Penetrationsbarriere (Köller, 1991). Auch epikutikulare Wachse dienen als physikalischer, aber auch als chemischer Schutz. Sie können fungizide Substanzen enthalten, die eine Besiedlung der Oberflächen unterbinden sollen (Blakeman & Atkinson, 1981).

Im Rahmen dieser Arbeit wird besonderes Augenmerk auf die Rolle der epikutularen Wachse bei der Vermeidung eines Krankheitsbefalls gerichtet. Eine wichtige Aufgabe der epikutularen Wachse ist gemäß Barthlott & Neinhuis (1997) die Abwehr von Pathogenen über die Abreinigung der Mikroorganismen von der Oberfläche. Die Bedeutung dieser Funktion im Falle spezieller Wirt-Pathogen-Beziehungen wird hier näher untersucht.

Wirt-Pathogen-Beziehung Weizen und Echter Mehltau

Pathogene verursachen bei Nutzpflanzen große wirtschaftliche Schäden. Deshalb ist die Aufklärung der Interaktionen zwischen Pflanze und Pathogen und darauf basierend die Entwicklung möglicher Schutzmechanismen von großem Interesse.

Hinsichtlich der Anbaufläche und der Produktion nimmt unter den Getreidearten der Saatweizen (*Triticum aestivum*) einen Spitzenplatz ein und ist damit eines der wichtigsten Futter- und Nahrungsmittel (Franke, 1997). Mit 550 Millionen Tonnen gehört Weizen zu den drei wichtigsten Getreidearten weltweit (FAO, 2004).

Trotz pathogenresistenter Züchtungen führen auch beim Weizen zahlreiche Krankheitserreger zu Ernteaussfällen. Zu den Wichtigsten gehören Mehltaupilze, die durch Befall des assimilierenden Blattgewebes die Blätter schädigen und damit ein vorzeitiges Altern hervorrufen (Wiese, 1991). Eine solche Schadwirkung führt direkt zu Ertragsausfällen (Carver & Griffith, 1981).

Innerhalb der Gruppe des Echten Mehltaus (*Erysiphales*) unterscheidet man rund 150 Arten, die an unterschiedlichen Pflanzen Krankheiten hervorrufen können (Müller & Loeffler, 1992; Saenz & Taylor, 1999). Eine gute Übersicht über die Mehltaupilze bietet Yarwood (1957) und für die in Europa verbreiteten Arten Braun (1995). Weizen wird

von der Art *Blumeria graminis* in ihrer Formspezies *tritici* befallen. Dieser Pilz ist obligat biotroph und überzieht Blätter und Halme von Weizen mit einem dichten Mycel (Abb. 4.1).

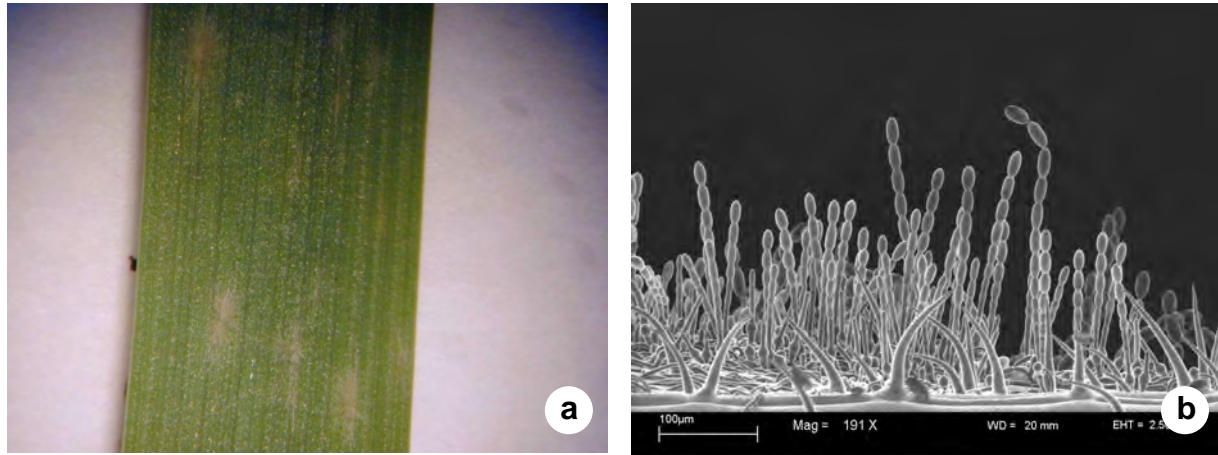


Abb. 4.1: a: Weißes Mycel von *B. graminis* auf Weizen-Blättern. b: REM-Aufnahme eines mit *B. graminis* befallenen Weizen-Blattes (191x vergrößert).

Eine Zusammenfassung über die Entwicklung des Mehltaus nach der Landung auf einer Wirtsoberfläche geben Green *et al.* (2002) oder Bélanger *et al.* (2002) wieder. Der Befall und die Entwicklung des Mehltaus werden durch verschiedene Umweltfaktoren bestimmt. Die optimale Temperatur für eine Infektion liegt zwischen 15 und 20°C (Cherewick, 1944). Auch bei 0°C als Minimaltemperatur kann noch eine Infektion erfolgen, als maximale Temperatur wurde 36°C ermittelt (Mount & Slesinski, 1971). Dabei spielt die Luftfeuchtigkeit eine untergeordnete Rolle, da die Konidien bei allen Luftfeuchten keimen können; die höchsten Keimraten wurden allerdings bei 100% relativer Luftfeuchte beobachtet (Cherewick, 1944).

Wasser spielt für alle Pilzarten bei der Keimung eine entscheidende Rolle. Bei Mehltaukonidien liegen jedoch in der Literatur unterschiedliche, teilweise sogar widersprüchliche Angaben über die Bedeutung von freiem Wasser für die Keimung vor. Merchán & Kranz (1985) konnten keinen negativen Einfluss des Wassers auf die Keimfähigkeit und Appressorienbildung beobachten. Im Gegensatz dazu berichten Mount & Slesinski (1971) und Wheeler (1981) von einer Reduktion der Keimfähigkeit bei Anwesenheit von freiem Wasser. Dabei könnte auch ein negativer Einfluss indirekt über Sauerstoffmangel hervorgerufen werden, der bei einer lang anhaltenden Benetzung der Blattoberfläche möglich ist. Die in Keimung befindlichen, stoffwechselaktiven Konidien könnten empfindlich auf diesen Zustand reagieren Holthuis *et al.* (1990). Die

Rolle des Wassers als indirekter Auslöser der Keimung wird von Yang & Ellingboe (1972) diskutiert. Sie gehen davon aus, dass Keimungs-Stimulatoren aus den Kutikularwachsen ausgewaschen werden können. Zwar sind in Kutikularwachsen wasserlösliche Substanzen enthalten, Keimungs-Stimulatoren konnten für *B. graminis* bei Getreideblättern allerdings nicht nachgewiesen werden (Blakeman & Atkinson, 1976). Wie selbst bei relativ trockenen Bedingungen eine Keimung erfolgen kann, beschreibt bereits Yarwood (1950). Er geht davon aus, dass die Mehltaukonidien das für die Keimung nötige Wasser bereits enthalten. Diese Annahme bestätigten auch die Versuche von Brodie & Neufeld (1942). Der Wassergehalt hängt dabei von den Umweltbedingungen ab, unter denen die Konidien gebildet wurden (Harris & Manners, 1983).

Die Konidien von *B. graminis* werden über die Luft vertragen. Sie reifen kontinuierlich an Konidienträgern heran und werden oft als kleine Aggregate oder in kurzen Ketten abgelöst (Bainbridge & Stedman, 1979). Ihre Reichweite wird von Cherewick (1944) als sehr gering eingeschätzt. Die Konidien bleiben nach dem Abflug nur kurz keimungsfähig, so dass Distanzen von maximal 700 Metern möglich sind. Der Einfluss der Oberflächen auf die Landung und die Etablierung der Konidien wird in der Literatur widersprüchlich diskutiert. Während Gregory (1971) und Dutzmann *et al.* (1981) behaupten, dass eine Behaarung der Wirtsoberflächen die Konidienlandung von *B. graminis* fördert, gehen Dickinson (1960) und Holthuis (1989) wiederum davon aus, dass Haare als passiver Resistenzfaktor gelten können, in dem sie die Konidien auf Abstand zur Oberfläche halten.

Gelandete Konidien können aber auch durch starke Blattbehaarung vor Witterungseinflüssen wie Regen und Wind geschützt werden, wodurch eine Etablierung erleichtert wird. Gleichzeitig verbessern Trichome das Mikroklima der Wirtsoberflächen (Holthuis, 1989). Faltungen, Blattadern und andere Oberflächenrauigkeiten, z. B. Wachsauflagerungen, verbessern nach Grace & Collins (1976) die Haftung der Konidien. Auch Dickinson (1960) erwähnt, dass ein erhöhter Befall mit *B. graminis* bei Gerstenblättern mit ausgeprägten Wachsauflagerungen beobachtet werden kann. Almihanna & Lösel (1995) berichten dagegen, dass dichte Wachsbeläge vor allem bei pathogenresistenten Getreidekultivaren von Weizen vorkommen.

Nach der Landung auf einer Oberfläche finden bereits vor der Keimung im Konidium wichtige Prozesse statt. Wenige Minuten nach dem Kontakt mit der Oberfläche werden extrazelluläre polymere Substanzen (EPS) produziert (Kunoh *et al.*, 1988, 1991; Nielsen

et al., 2000). Da es keine Rolle spielt, ob die Oberfläche hydrophob (z.B. Weizen) oder hydrophil (z.B. Cellophan) ist, gehen Kunoh *et al.* (1988) und Nicholson *et al.* (1993) davon aus, dass es sich bei der EPS-Produktion um eine Reaktion handelt, die nur durch den Kontakt hervorgerufen wird (Thigmotropismus). Währenddessen finden weitere Umwandlungen statt. Kunoh *et al.* (1988) beobachteten eine Veränderung der Oberfläche des Konidiums. Sie wird von einer Art Film umgeben. Die Bildung des EPS verläuft nach Nicholson *et al.* (1988) in zwei Schritten. Erstmals wird Material bereits nach zwei Minuten abgegeben. 10-15 Minuten nach dem Kontakt kann eine weitere Bildung von EPS beobachtet werden. Das extrazelluläre Material enthält zur Auflösung der Wirtskutikula Esterasen und Kutinasen (Pascholati *et al.*, 1992), möglicherweise auch Cellulasen und Pektinasen (Suzuki *et al.*, 1998). Die Tatsache, dass Mehltaukonidien die epikutikularen Wachse anlösen ist schon seit längerem beschrieben (Staub *et al.*, 1974; Wheeler, 1981). Welche Rolle sie jedoch für den Infektionsprozess spielen und ob die Kutikula zersetzt werden muss, ist umstritten. Wheeler (1981) glaubt, dass die Erosion der Wachse und der Kutikula die Kontaktfläche zwischen Konidie und Wirt erhöht und damit die Penetration erleichtert wird. Nicholson (1996) wiederum geht davon aus, dass die Kutinase in den Erkennungsprozess selbst involviert ist.

Eine weitere entscheidende Veränderung der Konidien ermöglicht überhaupt erst die Bildung von Appressorien Nicholson *et al.* (1993). Durch die EPS wird die zuvor hydrophobe Konidienoberfläche in eine hydrophile Oberfläche umgewandelt. Ob jedoch die EPS direkt diese Veränderung verursachen, ist bislang nicht geklärt. Auch die Wirtsoberfläche wird durch das extrazelluläre Material in ihren chemischen Eigenschaften verändert. Die zuvor hydrophobe Oberfläche wird ebenfalls hydrophil. So können nach Nicholson *et al.* (1993) ideale Bedingungen für die Keimung der Konidien geschaffen werden. In ihren Versuchen bildeten Mehltaukonidien nur auf hydrophilen Oberflächen Appressorien aus.

Verschiedene biotische und abiotische Faktoren wirken sich auf die Keimung und Appressorienbildung aus. Yang & Ellingboe (1972) haben auf natürlichen Wirtsoberflächen, isolierten Wachsen und künstlichen Oberflächen die Appressorienbildung untersucht und stellten fest, dass nur auf der natürlichen Wirtsoberfläche eine normale Entwicklung zu beobachten war. Auf den anderen Oberflächen kam es vermehrt zur Fehlbildung der Appressorien. Ähnliche Ergebnisse erzielten auch Carver & Ingerson (1987).

Auch die Dicke der Wachse könnte eine Rolle beim Befall spielen. Nach Almihanna & Lösel (1995) ruft bei anfälligen Arten eine Infektion stärkere Produktion der Wachse hervor, wohingegen bei resistenten Arten diese Reaktion unterbleibt. Carver *et al.* (1990, 1995b) stellten im Gegensatz dazu fest, dass der physikalische Einfluss von epikutikularen Wachsen auf die Keimung von *B. graminis* nur sehr gering ist. Ungeklärt ist jedoch die Abnahme der Keimrate bei der Entfernung der Wachse.

Bislang nur wenig untersucht ist der Einfluss von Niederschlägen auf die Infektion mit Mehltau verursachenden Konidien. Nach Merchán & Kranz (, 1986 a, b, c) werden weder die Konidienbildung, noch die Entwicklung der Konidien durch Regen beeinflusst. Die primären Prozesse eines Befalls in Abhängigkeit der Niederschläge wurden bislang allerdings kaum untersucht. Nur Holthuis *et al.* (1990) führten einige Versuche zur Bedeutung des Regens für eine erfolgreiche Infektion durch.

Bei der Keimung von *B. graminis* entstehen, anders als bei den meisten Mehltauarten, zwei Keimschläuche (Nicholson & Kunoh, 1995). Sechzig Minuten nach dem ersten Kontakt wird ein kurzer primärer Keimschlauch gebildet (Kunoh *et al.*, 1990), der spätestens zwei Stunden nach der Inokulation fest an der Oberfläche haftet (Green *et al.*, 2002). Er erfüllt verschiedene Funktionen. Zu einem verankert er die Konidie an der Oberfläche, weitere Funktionen werden in der Erkennung der Wirtsoberfläche (Carver & Ingerson, 1987) und der Absorption von Wasser zur Unterstützung der Keimung (Carver & Bushnell, 1983) gesehen. Nach ca. sechs Stunden wird der längere, sekundäre Keimschlauch gebildet (Kunoh *et al.*, 1990). Da die vorliegende Studie sich ausschließlich mit den primären Adhäsionsprozessen beschäftigt, spielen die Vorgänge mehre Stunden nachfolgend keine Rolle mehr.

4.3 Material und Methoden

Pflanzenmaterial

Für die Versuche wurden drei Sorten des Saatweizens (*Triticum aestivum* L.) mit unterschiedlichen Anfälligkeiten (Tab. 4.1) gegenüber Mehltau ausgewählt (Bundessortenamt, 2002). Die Samen wurden vom Institut für Pflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (Bereich Phytomedizin) in Bonn bereitgestellt, wo auch die Aussaat und anschließende Kultur in den Gewächshäusern erfolgte. Die Temperatur im Gewächshaus betrug 20-25°C, die relative Luftfeuchte 15-85% und die Belichtungsdauer 14 Std. täglich. Der Weizen wurde in Töpfen angezogen, in die jeweils 10 Samen eingepflanzt wurden. Nach 14-20 Tagen Wachstumsphase wurden

ausschließlich die Sekundärblätter der Pflanzen für die Experimente eingesetzt und nur deren adaxiale Blattoberflächen untersucht.

Tab. 4.1: Verwendete Weizensorten

Sorte	Anfälligkeit für Mehltau	Resistenzgene gegen Mehltau
Kanzler	unbekannt	Nein
Kris	Sehr gering bis gering	Ja
Ludwig	gering	Nein

Quelle: Bundessortenamt (2002)

Inokulum

Blumeria graminis (DC) Speer f.s. *tritici* Em. Marschal ist ein obligat biotrophes Pathogen. Er wurde am Institut für Pflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (Bereich Phytomedizin) in Bonn auf Weizenpflanzen der Sorte „Kanzler“ kultiviert.

Folgende Kulturbedingungen lagen vor:

- Temperatur 18-25°C
- rel. Luftfeuchte 60-75%
- Belichtungsdauer 14 Std.

Für die Inokulation wurden die Konidien von *B. graminis* vor jedem Versuchsbeginn frisch von den Wirtspflanzen abgeerntet. Um ältere Konidien auszuschließen erfolgte 15 Stunden vor der eigentlichen Ernte ein leichtes Schütteln der Pflanzen. Dadurch wurden ältere Konidien abgetrennt. Um die frischen, nachgewachsenen Konidien zu gewinnen, wurden die befallenen Blätter vorsichtig über eine mit Aluminiumfolie ausgekleidete Schüssel gehalten. Dann wurden die Blätter geschüttelt und die Konidien aufgefangen. In der Schüssel verschlossen wurden die Konidien ans Nees-Institut transportiert, wo sie für die Inokulation mit einem feinen, zuvor in Ethanol (99,8%) gereinigten Pinsel zusammengefasst wurden. Die Inokulation der Weizenpflanzen erfolgte im direkten Anschluss an die Ernte der Konidien.

Kontaktwinkelmessung

Die Messung zur Charakterisierung der Unbenetzbarkeit von Weizen wurde mit einem manuellen Goniometer der Firma Krüss GmbH (Typ Nr. G1) mit Aqua dest. bei 22°C Raumtemperatur durchgeführt. Von den Weizenblättern wurden jeweils 3x1 cm große Stücke für die Untersuchung ausgeschnitten und mit doppelseitigem Klebeband (Tesa Fix Doppelband, Tesa, Hamburg) flach auf einem Objektträger befestigt. Die Messung

erfolgte durch manuelles Aufsetzen eines 15 μ l Tropfens wie bei Fürstner (2002) beschrieben. Von jeder Weizensorte wurden insgesamt 15 KW ermittelt, wobei pro Blattstück max. zwei Tropfen vermessen wurden. Aus den Werten der Einzelmessungen wurden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung errechnet.

Rasterelektronenmikroskopie

Zur Beschreibung der Oberflächen und zur Dokumentation wurden alle Sorten mittels REM wie in Kap. 2.2 beschrieben untersucht. Zudem wurde das REM auch bei der Analyse der Befallsermittlung eingesetzt.

Für die Analyse des Befalls der Pflanzenoberflächen mit Pilzen wurde auf eine besondere Präparation verzichtet, da diese in Anbetracht der großen Anzahl an untersuchten Oberflächen zu langwierig gewesen wäre. Die Oberflächen und Pilze wurden als Trockenpräparate untersucht. Die sonstige Präparation und die Einstellungen entsprachen der im Kap. 2.2 beschriebenen Vorgehensweise.

Zur exemplarischen Dokumentation des Befalls von Weizen mit *B. graminis* wurde Frischmaterial ohne weitere Präparation wie in Kap. 2.2 beschrieben auf die Aluminiumteller geklebt und leitend mit dem Teller mittels Leitkohle verbunden. Anschließend wurden die Proben direkt im REM betrachtet. Für ca. 10 Minuten konnten auf diese Weise sowohl das Blatt wie auch der Pilz im noch turgeszenten Zustand dokumentiert werden (vgl. Abb. 4.1b).

Probenvorbereitung für Selbstreinigungstest und Inokulation

Für den Selbstreinigungstest wurden jeweils zehn Sekundärblätter pro Sorte frisch von den kultivierten Weizenpflanzen abgeschnitten. Daraus wurden zehn Blattstücke (ca. 10x15 mm) pro Sorte herausgeschnitten. Bei jeweils fünf der Blattproben wurden die Wachse vorsichtig mit einem Wattebausch ähnlich wie bei Schwab *et al.* (1995) beschrieben abgewischt. Durch das Abwischen wurde die dreidimensionale Kristallstruktur der epikutularen Wachse zerstört, das Wachs jedoch nicht vollständig von der Oberfläche entfernt (Abb. 4.2b). Die Proben wurden auf REM-Tellern mittels doppelseitigem Klebeband (Tesa Fix Doppelband, Tesa, Hamburg) fixiert. Die Teller wurden anschließend auf einer Lochplatte (handelsübliches Holz, 30x30x1 cm) zufällig angeordnet.

Für das Inokulationsexperiment wurde mit acht frisch abgeschnittenen Sekundärblättern pro Sorte gearbeitet. Diesmal wurden bei jeweils vier Blättern pro Sorte die Wachse

vorsichtig mit einem Wattebausch (Schwab *et al.*, 1995) abgewischt, die übrigen vier blieben intakt. Von den Blättern wurden ebenfalls ca. 10x15 mm große Proben verwendet, wie oben beschrieben auf REM-Tellern fixiert und zufällig angeordnet auf einer Lochplatte (s. Abb. 4.3) für die Inokulationskammer vorbereitet.

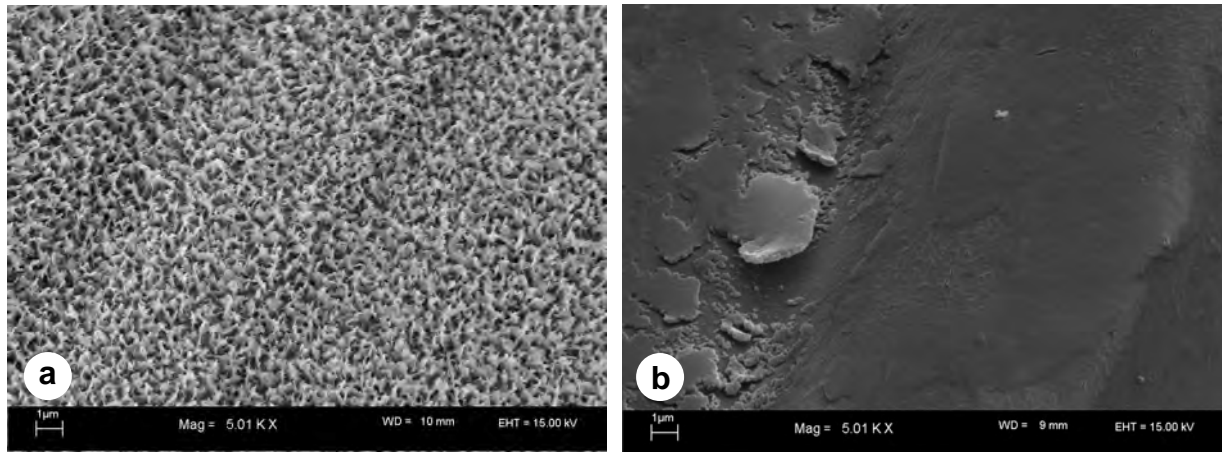


Abb. 4.2: Vergleich einer Weizenoberfläche (Sorte „Ludwig“) mit intakten Wachsen (a) und mit Watte abgewischten Wachsen (b).

Selbstreinigungstest

Die Prüfung der selbstreinigenden Eigenschaften wurde gemäß der Methode von Fürstner (2002) durchgeführt. Die vorbereiteten Weizenproben (s.o.) wurden in einer Kontaminationskammer mit künstlichen Schmutzpartikeln (hydrophobiertes Leuchtstoffpulver Farbe 20, Osram, Schwabmünchen) verschmutzt. In dieser Kammer war eine gleichmäßige Verschmutzung der Proben möglich. Die Belegung der Oberfläche kann nach dieser Methode über Partikel pro Fläche statistisch erfasst werden. Da eine Bestimmung der Partikelbelegung vor und nach dem Regen auf der gleichen Probe wegen der dazwischen liegenden Analyse im REM nicht möglich ist, wurde mit Referenztellern gearbeitet. Um die Partikel pro Fläche zu bestimmen, wurden zusätzlich vier Referenz-REM-Teller in der Kammer exponiert. Diese Teller wurden mit Leit-Tabs (Plano GmbH, Wetzlar, Ø 12mm) versehen. Diese Teller wurden nicht mit beregnet und ermöglichten die Einschätzung der Belegung nach der Verstäubung.

Die Belegung dieser Teller wurde als Grundbelegung definiert und von diesem Wert ausgehend später die Abreinigung von Schmutzpartikeln auf den Weizen-Oberflächen bestimmt.

Im nächsten Schritt wurden die Weizenoberflächen einem Niederschlag ausgesetzt, um die Abreinigung der Schmutzpartikel zu ermöglichen. Da die kinetische Energie von

Regentropfen eine zusätzliche Reinigungswirkung hervorrufen würde (Barthlott & Neinhuis, 1997), wurde bei dem Testverfahren ausschließlich ein feiner Tröpfchennebel eingesetzt. Dieser sinkt nur langsam ab und besitzt damit eine geringe kinetische Energie. Die nach dem Niederschlag pro Oberfläche verbliebenen Partikel wurden mittels Kathodolumineszenz im REM (20 kV, Arbeitsabstand=10mm, 400-fache Vergrößerung) erfasst und als Flächenanteil in Prozent angegeben. Durch Signalinvertierung erhielt man ein Bild, bei dem sich die dunklen Partikel von dem hellen Hintergrund abhoben. Die Bilder wurden über ein Bilddatenanalyseprogramm (Scion Image, Scion Corporation, Beta Version 4.0.2) bearbeitet, so dass eine Angabe von Flächenanteilen möglich wurde (detaillierte Beschreibung der Methode s. Fürstner (2002)).

Von den fünf Weizenblattstücken pro Sorte und Variante (Wachs intakt/zerstört) wurden jeweils 10 zufällig ausgewählte Bildausschnitte dokumentiert. Bei den Referenztellern (100% Belegung) wurden ebenfalls jeweils 10 Bildausschnitte pro Teller dokumentiert. Anschließend wurden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung bestimmt. Die Belegung der Referenzteller entsprach der 100% Verschmutzung, ausgehend davon wurde die Restbelegung der Weizenproben in Prozent angegeben.

Inokulation mit Konidien

Die Lochplatte mit den Proben wurde in eine Inokulationskammer (Abb. 4.3) gelegt. Im oberen Teil der Kammer befand sich ein Behältnis, in das die geernteten Konidien gegeben wurden. Nach Verschluss der Kammer wurde von oben durch eine kleine Öffnung mit einem Schlauch für 5 Sek. Druckluft eingeblasen. Auf diese Weise wurden die Konidien aus dem Behältnis verstäubt. Das Schlauchende befand sich ca. 5 cm oberhalb der Konidien. Nach dem Verstäuben der Konidien sedimentierten diese langsam auf die im unteren Teil der Kammer befindlichen Proben. Die Entnahme der Proben für die Beregnung bzw. die Beneblung erfolgte je nach Versuch nach 60, 120 oder 180 Minuten. Die Inokulation wurde bei 18°C und einer rel. Luftfeuchte von 40-43% durchgeführt.

Um die Konidiendichte nach der Inokulation zu bestimmen, musste wie bei dem Selbstreinigungstest auf Referenzteller zurückgegriffen werden. Dafür wurden zusätzlich vier Referenz-REM-Teller auf der Lochplatte ausgelegt. Diese Teller wurden mit Leit-Tabs (Plano GmbH, Wetzlar, Ø 12mm) versehen. Die Belegung dieser Teller wurde als

Grundbelegung (100%) definiert. Von diesem Wert ausgehend wurde später die Abreinigung von Konidien auf den pflanzlichen Oberflächen bestimmt.

Um zu verhindern, dass die Konidien bei der Entnahme und dem Transport von den Proben heruntergeweht wurden, erfolgte der Transport der Proben stets in einem verschlossenen Gefäß. Die Referenz-REM-Teller wurden bis zu Analyse der Grundbelegung in einem Exsikkator zwischengelagert.

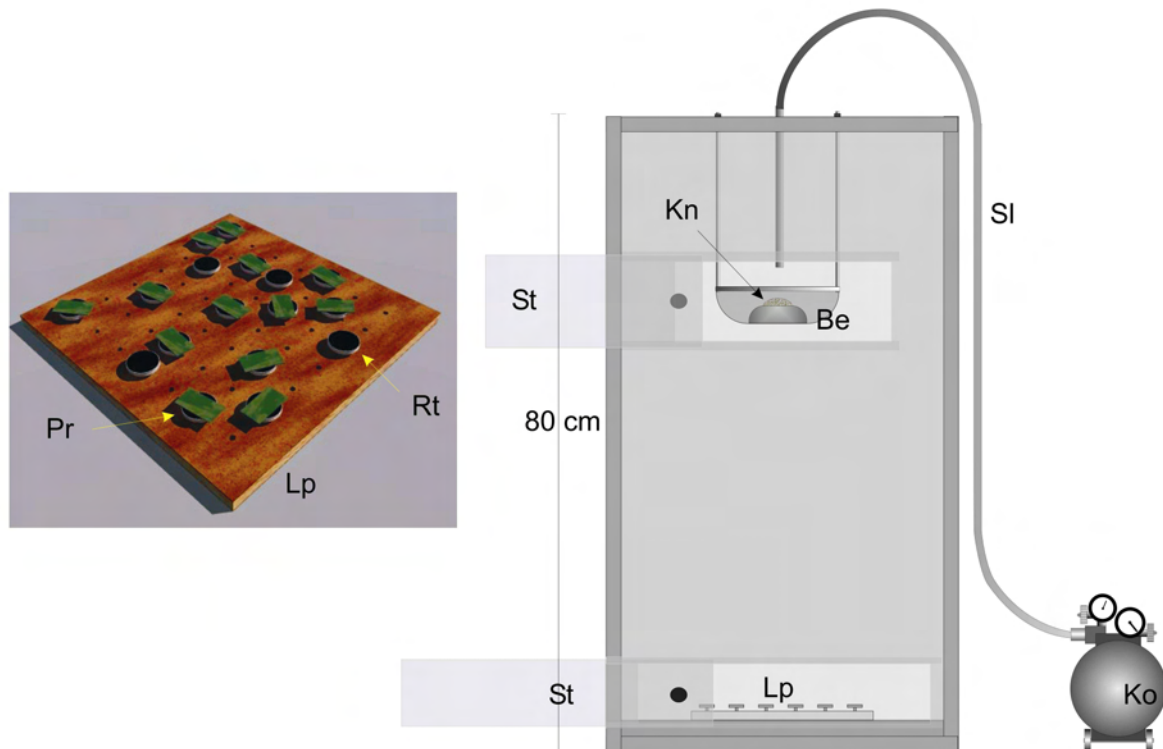


Abb. 4.3: Schematischer Aufbau der Inokulationskammer und der Lochplatte für Proben-teller

Be: Behälter für Konidien

Kn: Konidien

Ko: Kompressor

Lp: Lochplatte

Pr: Proben-teller

Rt: Referenz-teller

Sl: Schlauch

St: Schiebetür aus Plexiglas

Simulierte Beregnung und Beneblung

Für die simulierte Beregnung wurde ein einfacher Aufbau verwendet. Dieser bestand aus einer selbst hergestellten Brause, bestehend aus einem Kunststoffbehälter (\varnothing 40mm) und 24 Nadelkanülen (0,9 x 40 mm). Der Boden des Behälters wurde zuvor mit einem feinen Bohrer perforiert, die Nadeln eingesetzt und mittels Heißkleber wasserdicht verklebt. Für die Beregnung wurde die Brause in einer Höhe von 15 cm (Nadelaustrittsöffnung) über den Proben montiert. Die sich noch auf den REM-Tellern befindenden Weizenproben wurden in REM-Tellerhaltern (Einzelverpackung für

Stiftprobeteller, Plano GmbH, Wetzlar) in einem Winkel von 60° auf eine vorgefertigte Kunststoffunterlage gesetzt und mit 50 ml Aqua dest. beregnet (vgl. Abb. 4.4). Während des Niederschlagsereignisses wurden die Proben kontinuierlich horizontal bewegt, um eine gleichmäßige Beregnung zu erzielen. Anschließend wurden alle Proben im Trockenschrank bei 35°C getrocknet, bevor sie für die Befallsermittlung im REM weiter vorbereitet wurden.

Die Beneblung erfolgte wie bei Fürstner (2002) beschrieben. In einer Nebelkammer (Folienzelt) mit einer Grundfläche von 2×1 m und einer Höhe von 2 m wurden die Proben in der Mitte auf einem um 45° geneigten Gestell befestigt. Über eine Hochdrucknebelanlage (HNS, OSBERMA, Engelskirchen-Osberghausen) mit sechs Düsen wurde ein feiner Nebel mit Tropfendurchmessern von $8\text{-}20 \mu\text{m}$ erzeugt. Die Anlage wurde mit Aqua dest. betrieben. Die Beneblungsdauer betrug 5 Minuten, wodurch ein Niederschlag von ca. 1,5 mm zustande kam. Nach dem Absinken des Nebels wurden die Proben aus der Kammer entnommen und vor der weiteren Bearbeitung im Trockenschrank bei 35°C getrocknet.

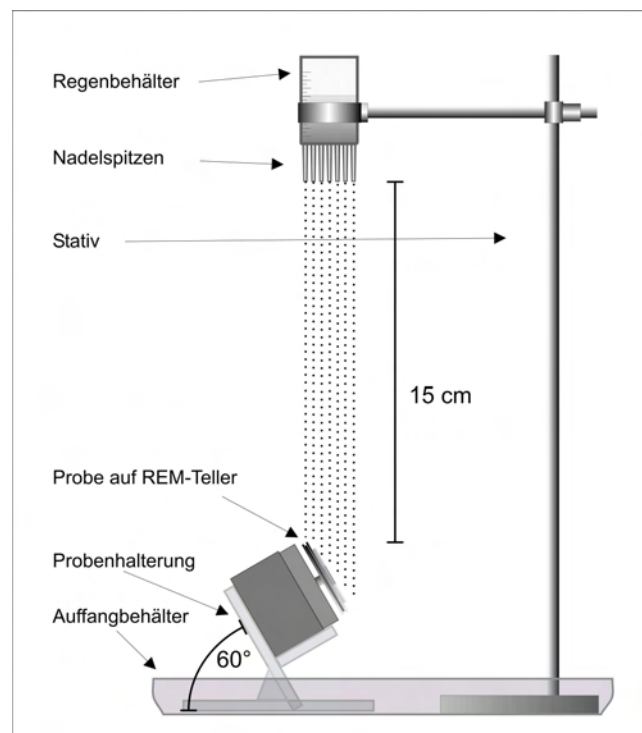


Abb. 4.4: Schematischer Aufbau der Beregnungsapparatur

Befallsermittlung

Die Auswertung der nach den Niederschlägen auf den Weizenoberflächen verbliebenen Konidien erfolgte nachträglich mit Hilfe von REM-Bildern. Von den jeweils vier Proben pro Sorte und Variante wurden an unterschiedlichen, zufällig ausgewählten Stellen 10

Bilder (Arbeitsabstand 10 mm, Kippwinkel 0°) bei 150-facher Vergrößerung aufgenommen. Mit dem integrierten REM-Softwaretool „Linewidth Measurement“ wurde bei jedem Einzelbild mit einem Rechteck (vgl. Abb. 4.5) eine Fläche markiert (Größe 326.000 - 329.000 μm^2). Dies entsprach einer insgesamt untersuchten Fläche pro Sorte und Variante (intakte oder abgewischte Wachse) von ca. 13 mm².

Pro Bild wurde die Anzahl der Konidien innerhalb der markierten Fläche gezählt. Konidien am linken und unteren Rand, welche nur teilweise innerhalb der Fläche lagen, wurden mitgezählt, Konidien am oberen und rechten Rand der markierten Fläche dagegen nicht. Neben der Anzahl wurde auch der Anteil gekeimter bzw. nicht gekeimter Konidien bestimmt. Im Falle von verklumpten Konidien wurden nur die auf dem Bild differenzierbaren gezählt.

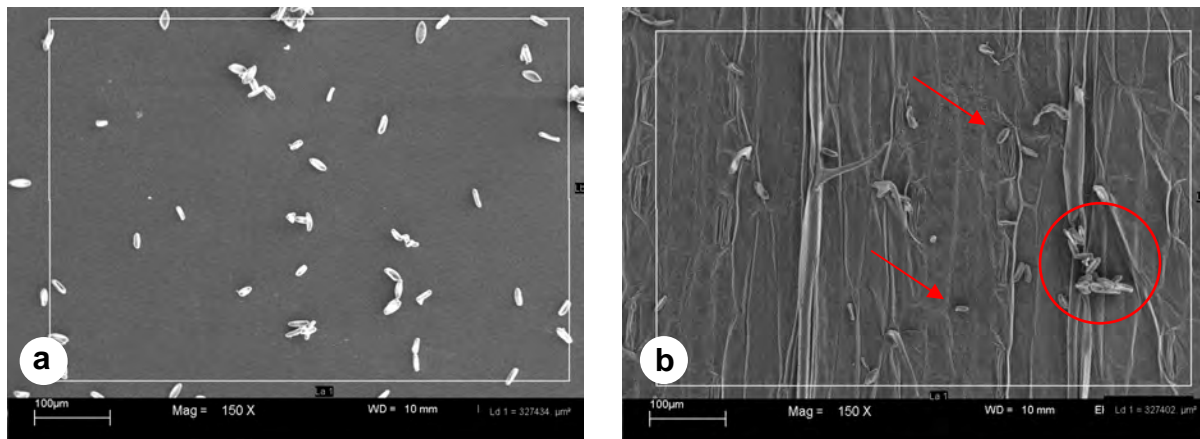


Abb. 4.5: Befallsermittlung mittels REM. a) Auszählen der Konidien auf Referenzteller. b) Nach Beneblung auf Blattoberfläche (Sorte „Ludwig“) verbliebene Konidien (Pfeile: Einzelne Konidien; Kreis: Agglomerierte Konidien).

Insgesamt wurden auf diese Weise pro Sorte und Variante 40 Bilder ausgewertet.

Auch bei den Referenztellern ($n=4$) wurde die Belegung mit Konidien auf einer Gesamtfläche von 13,1 mm² bestimmt.

Die Befallsermittlung fand nach folgendem Berechnungsschema statt:

Teller Referenzbelegung: Konidienanzahl pro Teller ausgehend von 10 zufällig ausgewählten Bildausschnitten (arithmetisches Mittel).

Gesamtreferenzbelegung: Arithmetisches Mittel gebildet über die vier Teller der Referenzbelegung. Definiert als 100% Belegung.

Blattbelegung: Anzahl Konidien pro Blatt ausgehend von 10 zufällig ausgewählten Bildausschnitten.

Gesamtbelegung: Arithmetisches Mittel gebildet über die vier Blattbelegungen.

Prozentuale Blattbelegung: Blattbelegung im Verhältnis zur Gesamtreferenzbelegung in Prozent.

Prozentuale Gesamtbelegung: Arithmetisches Mittel gebildet über die vier prozentualen Blattbelegungen.

Nach dem gleichen Berechnungsschema wurde auch die Anzahl der gekeimten Konidien ermittelt.

Für die Darstellung der Ergebnisse kamen sowohl die Konidienzahl als auch eine prozentuale Darstellung (bezogen auf Referenzbelegung) zur Anwendung.

Zusammenfassung des Versuchsablaufs zum Einfluss der Niederschläge auf den Befall von Weizen mit *B. graminis*

Zur Übersicht ist der Versuchsablauf von der Anzucht bis zur Auswertung in Abb. 4.6 schematisch dargestellt.

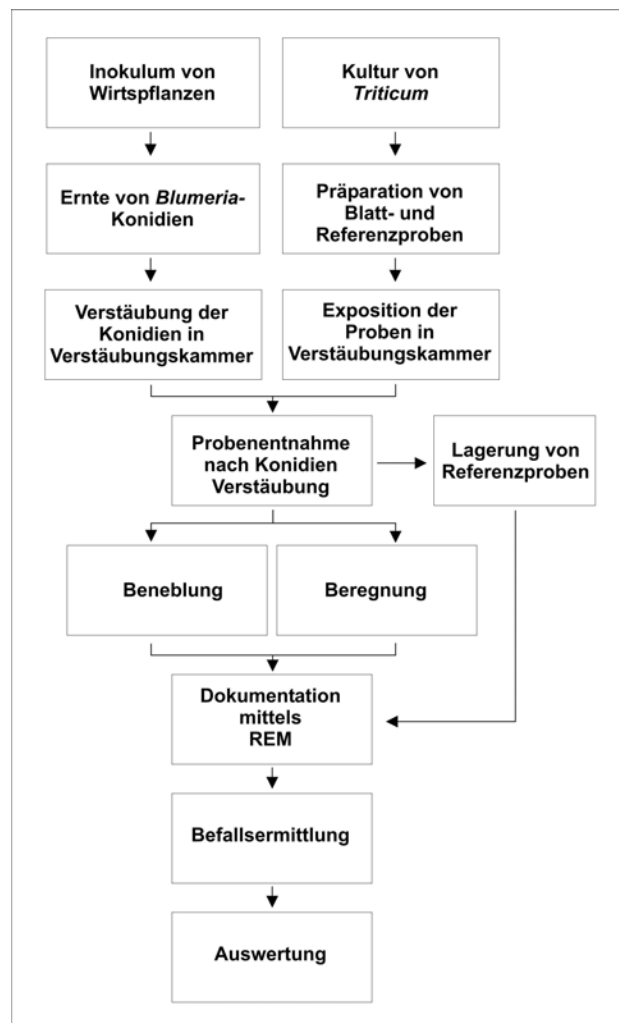


Abb. 4.6: Versuchsverlauf zum Einfluss von Niederschlägen auf den Befall von Weizen mit *B. graminis*.

4.3 Ergebnisse

Charakterisierung der Weizenblätter

Die Epidermiszellen aller verwendeten Weizensorten sind elongiert-tetragonal und vollständig von schuppenförmigen epikutikularen Wachskristallen überzogen. Bei „Kanzler“ ist die Dichte der Wachskristalle im Vergleich zu den beiden anderen Sorten sehr hoch. Neben den bei allen drei Sorten in regelmäßigen Reihen angeordneten Stomata finden sich bei den Sorten „Kanzler“ und „Ludwig“ zudem zahlreiche auch längere Blatthaare. Bei der Sorte „Kris“ wurden ausschließlich wenige kurze Haare gefunden. REM-Aufnahmen der Blattoberflächen finden sich im Anhang auf den Bildtafeln 1 und 2.

Benetzung der Weizenblätter

Alle drei untersuchten Weizensorten waren extrem unbenetzbar. Auf den intakten Weizenoberflächen lagen die ermittelten Kontaktwinkel zwischen 160° und 170° (Tab. 4.2). Im Gegensatz dazu lagen die Kontaktwinkel der Weizenoberflächen, bei denen die Wachse zuvor mechanisch zerstört wurden, mit 106° bis 110° deutlich darunter.

Tab. 4.2: Kontaktwinkel ($n=15$, ± 1 SD) der untersuchten Weizensorten*

Weizensorte	Wachse intakt	Wachse zerstört
Kanzler	$166^\circ \pm 3,5$	$110^\circ \pm 6,5$
Kris	$167^\circ \pm 2,8$	$106^\circ \pm 8,4$
Ludwig	$163^\circ \pm 2,9$	$106^\circ \pm 6,2$

Selbstreinigung der Weizenblätter

Bei allen drei Weizensorten mit intakten Wachsoberflächen wurde eine sehr effiziente Selbstreinigung der Blätter festgestellt. Im Vergleich zur Grundbelegung betrug die Restverschmutzung nur etwa 1% (Tab. 4.3). Bei den Oberflächen mit zerstörten Wachsen lagen die Werte um mehr als eine Zehnerpotenz höher.

* Daten aus der Diplomarbeit von Anne Stosch (2003): Wachstum von Pilzen auf superhydrophoben Oberflächen

Tab. 4.3: Prozentuale Restkontamination nach Selbstreinigungstest (n = 40, ± 1 SD)*

Weizensorte	Wachse intakt	Wachse zerstört
Kanzler	0,94% \pm 3,1	14,8% \pm 1,3
Kris	0,4% \pm 2,4	12,4% \pm 1,2
Ludwig	1,08% \pm 3,6	13,7% \pm 1,1

Befall nach Beneblung im zeitlichen Verlauf

Beneblung 1 h nach Inokulation (Abb. 4.7)

Die gemittelte Referenzbelegung betrug 1345 ± 286 Konidien. Dies entspricht einer Belegung von 412 Konidien pro Quadratmillimeter.

Während nach der Beneblung bei den Weizenblättern mit intakten Wachsen im Mittel deutlich weniger als 200 Konidien gezählt wurden, waren es bei den Oberflächen mit zerstörten Wachsen stets mehr als 1400 Konidien. Die Anzahl der gefundenen Konidien schwankte besonders stark bei den Oberflächen mit zerstörten Wachsen. Der Vergleich mit der Referenzbelegung macht deutlich, dass von den Oberflächen mit zerstörten Wachsen kaum Konidien abgewaschen wurden. Die teilweise höheren Werte bei den Oberflächen mit zerstörten Wachsen im Vergleich zu den Referenztellern sind auf Schwankungen der Belegung in der Verstäubungskammer zurückzuführen.

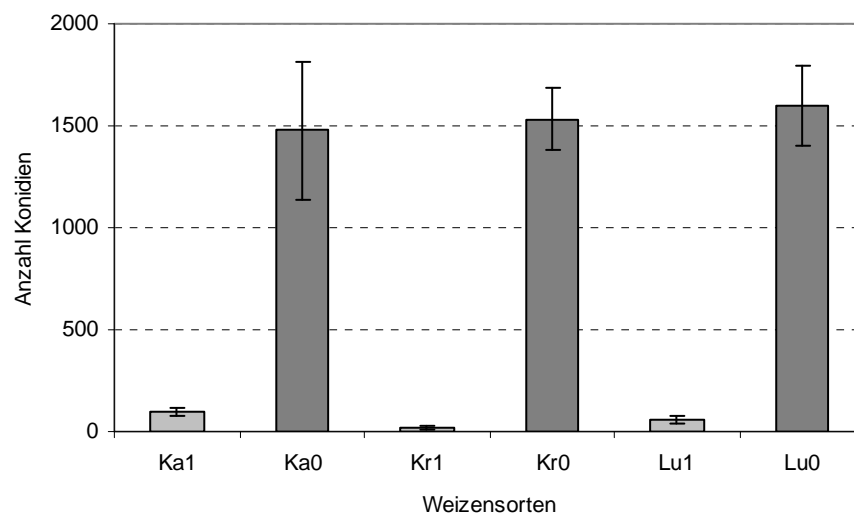


Abb. 4.7: Anzahl verbliebener Konidien auf Weizen bei Beneblung 1 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0 = zerstörte Wachse

* Daten aus der Diplomarbeit von Anne Stosch (2003): Wachstum von Pilzen auf superhydrophoben Oberflächen

Beneblung 2 h nach Inokulation (Abb. 4.8)

Die mittlere Referenzbelegung betrug 961 ± 300 Konidien.

Auch bei Beneblung nach zwei Stunden lag bei allen Weizensorten die Anzahl der gefundenen Konidien auf den Blättern mit zerstörten Wachskristallen deutlich höher als bei den intakten Oberflächen. Unterschiede zwischen den Sorten waren auch hier nur gering. Auch bei diesem Versuch war praktisch keine Abreinigung der Konidien auf den Oberflächen mit zerstörten Wachsen zu beobachten.

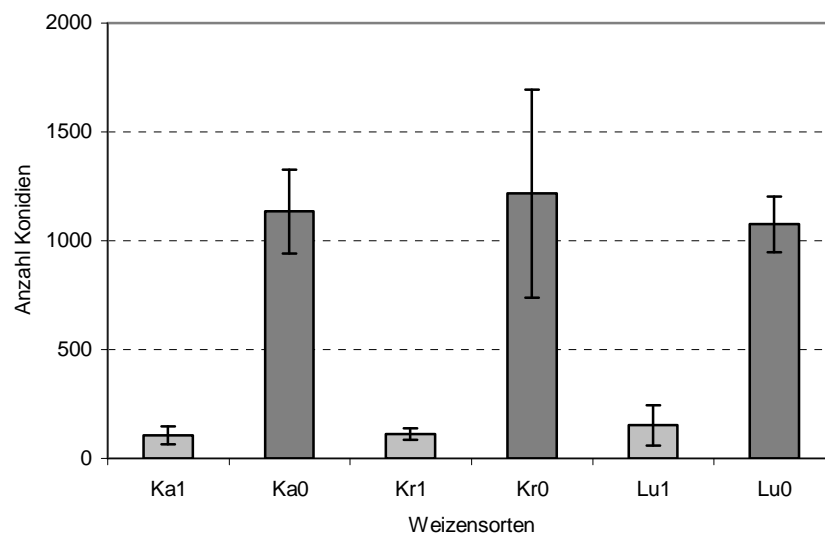


Abb. 4.8: Anzahl verbliebener Konidien auf Weizen bei Beneblung 2 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0= zerstörte Wachse

Beneblung 3 h nach Inokulation (Abb. 4.9)

Es wurde eine Referenzbelegung von 1044 ± 177 Konidien ermittelt.

Erneut lag ein deutlicher Unterschied in der Anzahl der Konidien zwischen Oberflächen mit intakten und zerstörten Wachsen vor. Die Anzahl der Konidien auf den Oberflächen mit intakten Wachsen blieb deutlich unter 200 Konidien. Bei den zerstörten Wachsen wurden jeweils über 1000 Konidien auf der gleichen Fläche ermittelt.

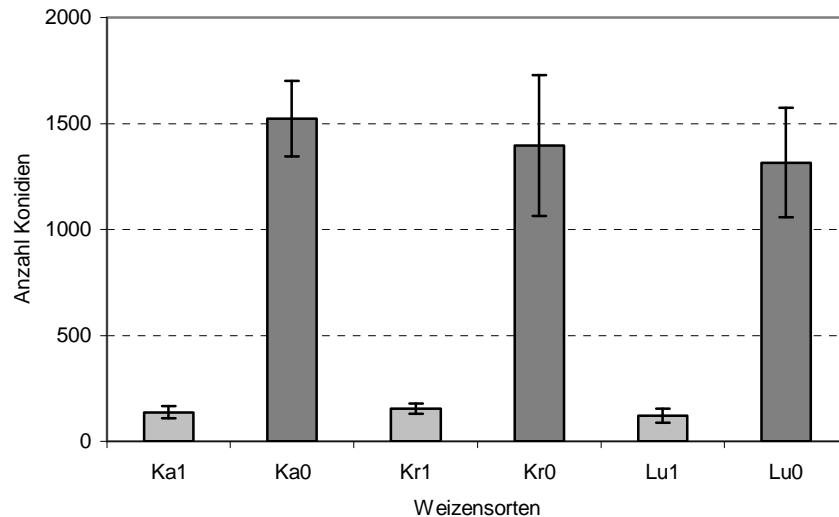


Abb. 4.9: Anzahl verbliebener Konidien auf Weizen bei Beneblung 3 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0 = zerstörte Wachse

Befall nach Beregnung im zeitlichen Verlauf

Beregnung 1 h nach Inokulation (Abb. 4.10)

Die ermittelte Referenzbelegung in diesem Versuch betrug 1116 ± 202 Konidien.

Die Unterschiede in der Anzahl der Konidien auf den Weizenoberflächen fielen relativ gering aus. Nahezu alle Konidien wurden durch den simulierten Regen abgewaschen. Eine leicht höhere Konidienzahl ließ sich auf den Oberflächen finden, deren Wachse zuvor entfernt wurden. Auf den Weizenblättern mit intakten Wachsen wurden fast keine Konidien mehr gefunden.

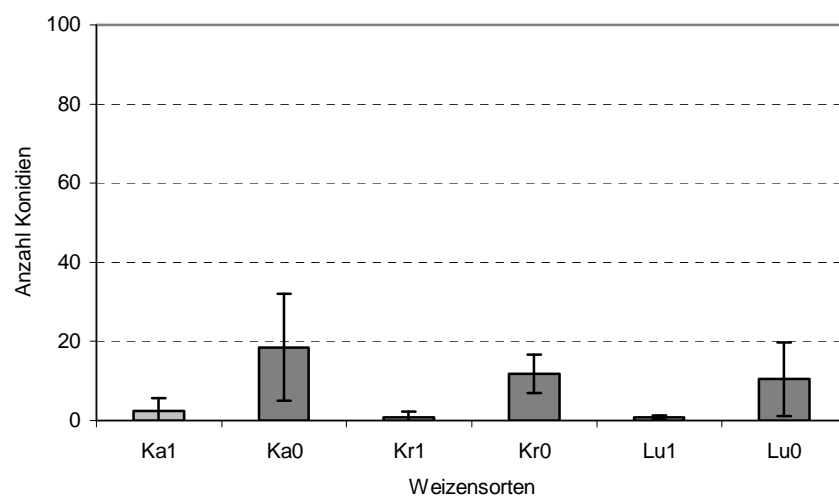


Abb. 4.10: Anzahl verbliebener Konidien auf Weizen bei Beregnung 1 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0 = zerstörte Wachse

Beregnung 2 h nach Inokulation (Abb. 4.11)

In diesem Experiment wurde eine Referenzbelegung von 154 ± 38 Konidien ermittelt. Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen zeigte sich hier ein anderes Ergebnis. Zwar waren wiederum nur wenige Konidien überhaupt auf den Oberflächen verblieben, aber Unterschiede zwischen intakten und zerstörten Wachsen konnten nicht mehr ausgemacht werden.

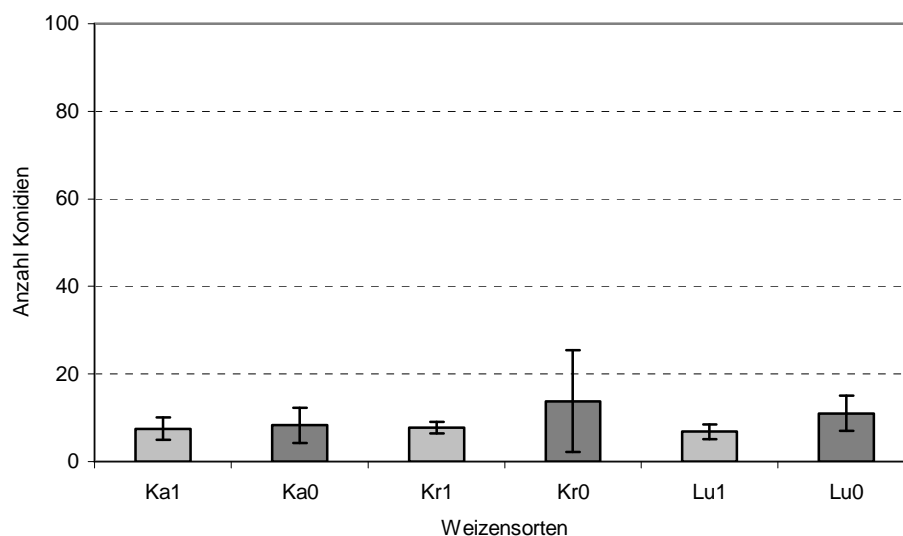


Abb. 4.11: Anzahl verbliebener Konidien auf Weizen bei Beregnung 2 h nach Inokulation. Sorten: Ka = Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0 = zerstörte Wachse

Beregnung 3 h nach Inokulation (Abb. 4.12)

Nach der Verstäubung wurde auf den Oberflächen gemäß den Referenztellern im Mittel eine Belegung von 874 ± 95 Konidien ausgemacht.

Nach drei Stunden konnten zwischen den Oberflächen mit intakten und zerstörten Wachskristallen deutliche Unterschiede in der Anzahl der verbliebenen Konidien beobachtet werden. Diese lagen jedoch bei allen Oberflächen im Mittel unter 100 Konidien. Die Schwankungen waren relativ hoch, besonders bei den Oberflächen mit zerstörten Wachsen.

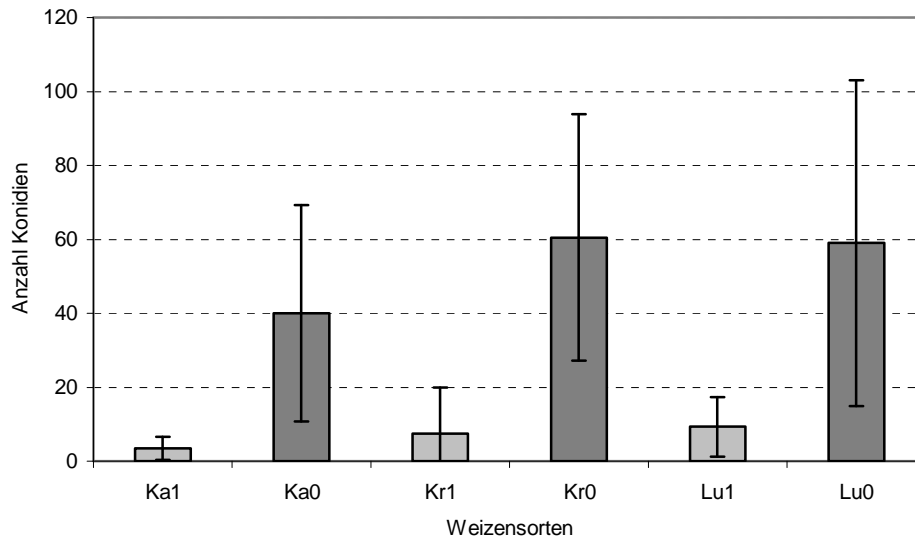


Abb. 4.12: Anzahl verbliebener *B. graminis* Konidien auf Weizen bei Beregnung 3 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0= zerstörte Wachse

Befallsänderung bei Beneblung im zeitlichen Verlauf

Sorte „Kanzler“ (Abb. 4.13)

Bei der prozentualen Konidienbelegung der Sorte „Kanzler“ waren weder bei den intakten, noch bei den zerstörten Wachsen signifikante Veränderungen über die Zeit zu beobachten. Es wurde lediglich ein schwacher Trend zu höherer Belegung mit größerem Abstand zwischen Inokulation und Beneblung festgestellt.

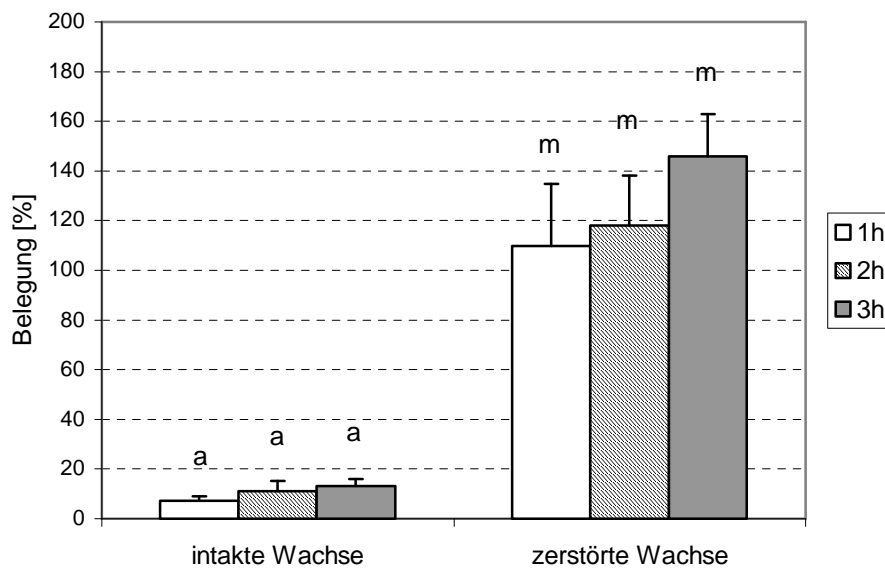


Abb. 4.13: Befall der Weizensorte „Kanzler“ mit *B. graminis* in Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beneblung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).

Sorte „Kris“ (Abb. 4.14)

Bei der Weizensorte „Kris“ wurde ein Trend zu höherer Belegung mit größerem Abstand zwischen Inokulation und Beneblung festgestellt. Dies galt sowohl für die Oberflächen mit intakten, wie auch mit zerstörten Wachsen.

Bei den Oberflächen mit intakten Wachsen war der Anstieg der Konidienanzahl von einer Stunde auf die zweite Stunde signifikant, der weitere Anstieg jedoch nicht mehr.

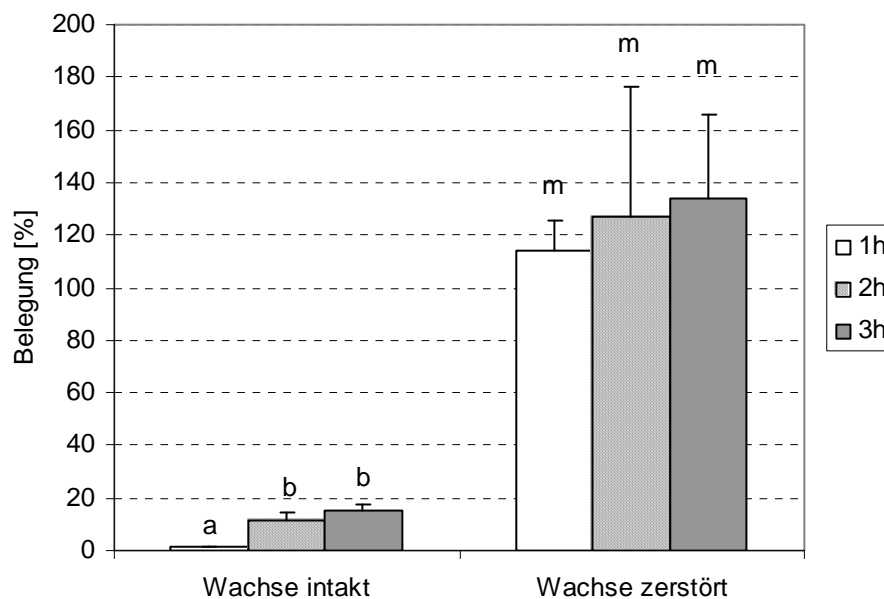


Abb. 4.14: Befall der Weizensorte „Kris“ mit *B. graminis* in Abhängigkeit der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beneblung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).

Sorte „Ludwig“ (Abb. 4.15)

Bei der prozentualen Konidienbelegung der Sorte „Ludwig“ war bei den intakten Wachsen eine signifikante Erhöhung der Belegung zwischen den Zeitspannen 1h und 2h zu beobachten. Bei noch größerer Zeitspanne zwischen Inokulation und Beneblung konnte kein weiterer Unterschied mehr festgestellt werden. Bei den Oberflächen mit zerstörten Wachsen konnte keine Änderung der Belegung mit größerem Abstand zwischen Inokulation und Beneblung festgestellt werden.

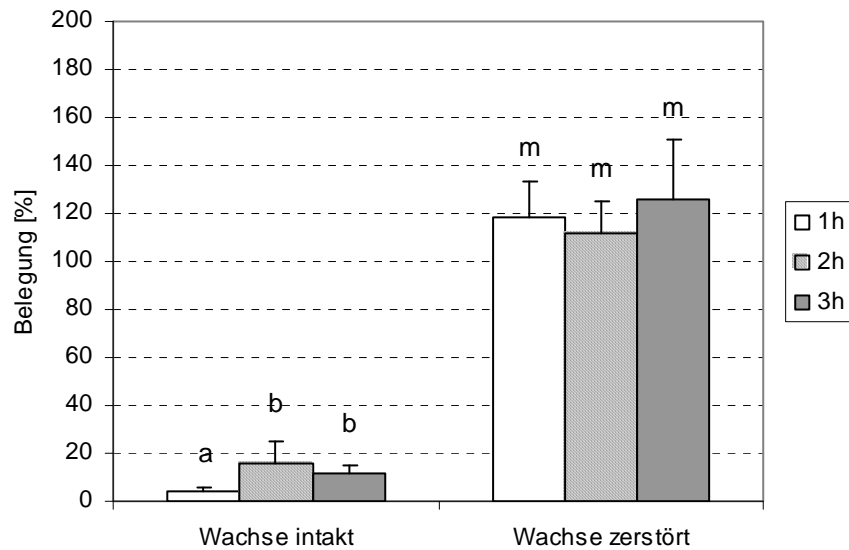


Abb. 4.15: Befall der Weizensorte „Ludwig“ mit *B. graminis* in Abhängigkeit der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beneblung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).

Befallsänderung bei Beregung im zeitlichen Verlauf

Sorte „Kanzler“ (Abb. 4.16)

Durch den simulierten Regen wurden die Konidien von den Oberflächen wesentlich effektiver abgewaschen als durch Nebel. Von den intakten Oberflächen wurden fast alle Konidien entfernt, unabhängig davon ob das Regenereignis eine oder drei Stunden nach der Inokulation stattgefunden hat. Lediglich das Ergebnis nach zwei Stunden weist eine leicht geringere Reinigung der Oberfläche auf.

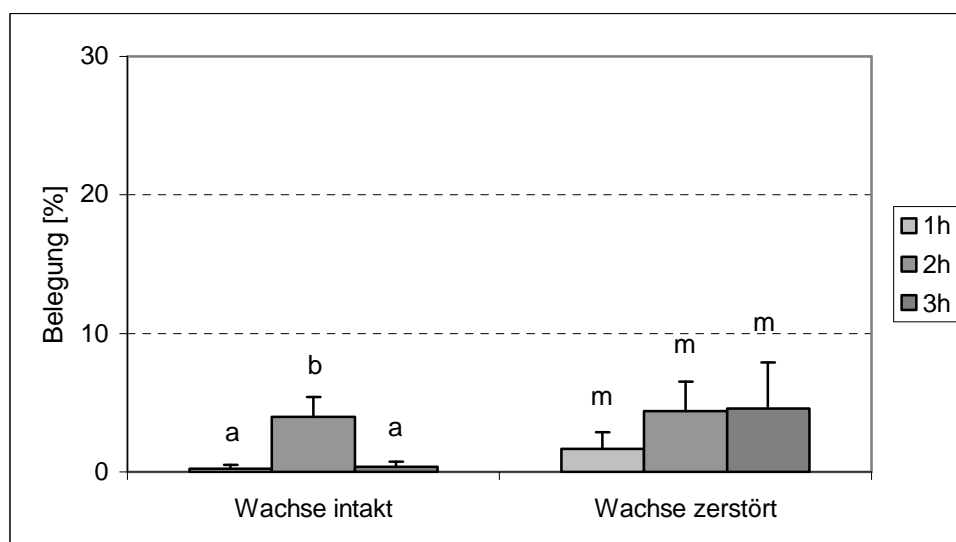


Abb. 4.16: Befall der Weizensorte „Kanzler“ mit *B. graminis* in Abhängigkeit der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beregung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).

Auf den Oberflächen mit zerstörten Wachsen war über die Zeit lediglich ein Trend zu größerer prozentualer Belegung zu beobachten.

Sorte „Kris“ (Abb. 4.17)

Bei Beregnung nach einer Stunde war eine fast vollständige Abwaschung zu beobachten. Erneut wurden nach zwei Stunden auf den Oberflächen im Vergleich zu den übrigen Ergebnissen signifikant mehr Konidien gefunden. Bei Beregnung nach drei Stunden betrug die Belegung jedoch wieder unter 1%.

Bei den Oberflächen mit zerstörten Wachsen lagen die prozentualen Belegungen leicht höher als bei den Oberflächen mit intakten Wachsen. Während nach einer Stunde ebenfalls nahezu alle Konidien abgewaschen wurden, war die Restbelegung nach zwei und nach drei Stunden signifikant höher.

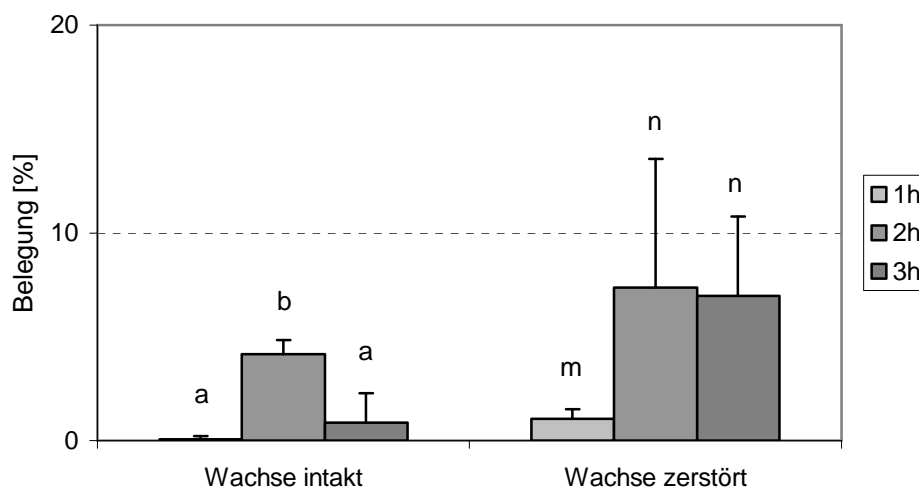


Abb. 4.17: Befall der Weizensorte „Kris“ mit *B. graminis* in Abhängigkeit der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beregnung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).

Sorte „Ludwig“ (Abb. 4.18)

Bei den intakten Oberflächen war nur bei Beregnung nach zwei Stunden eine höhere Konidienbelegung vorhanden. Bei den zerstörten Wachsen lag ein signifikanter Anstieg nach 2h bzw. 3h vor.

Tendenziell war ein Anstieg der Werte bei den zerstörten Wachsen mit größerer Zeitspanne zwischen Inokulation und Beregnung zu erkennen.

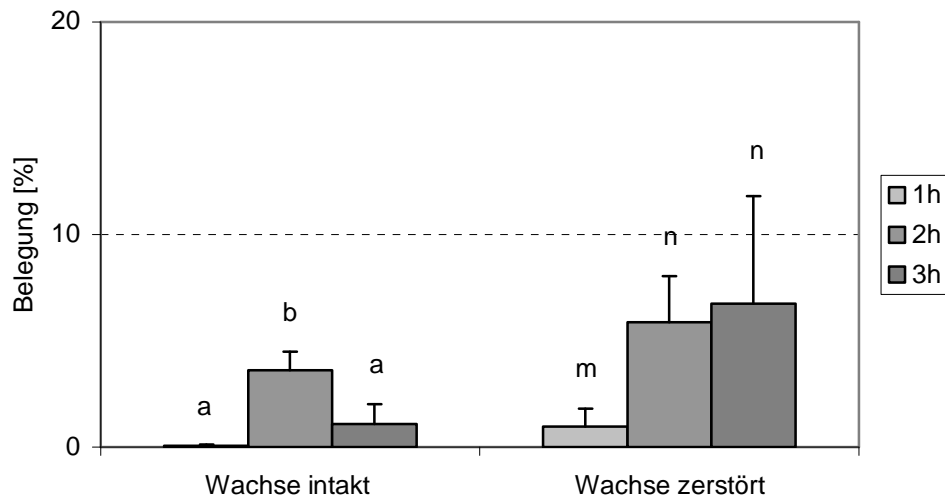


Abb. 4.18: Befall der Weizensorte „Ludwig“ mit *B. graminis* in Abhängigkeit der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beregnung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).

Keimrate nach simulierter Beneblung

Auf allen Oberflächen mit intakten Wachsen keimten deutlich mehr Konidien als auf den Oberflächen mit zerstörten Wachsen (Abb. 4.19). Dieses Ergebnis war in fast allen Fällen unabhängig von der Sorte und der Zeitspanne zwischen Inokulation und Niederschlagsereignis. Mit Ausnahme von „Kanzler“ (Beneblung eine Std. nach Inokulation) lag die Keimrate bei den intakten Oberflächen oberhalb von 70%. In Einzelfällen wurden sogar Werte $> 90\%$ erreicht. Bei „Kanzler“ und „Ludwig“ ließ sich ein leichter Trend zur Zunahme der Keimrate bei längerer Verweildauer auf den Oberflächen beobachten.

Die Keimrate auf den Oberflächen mit zerstörten Wachsen war mit ca. 10% um ein vielfaches geringer.

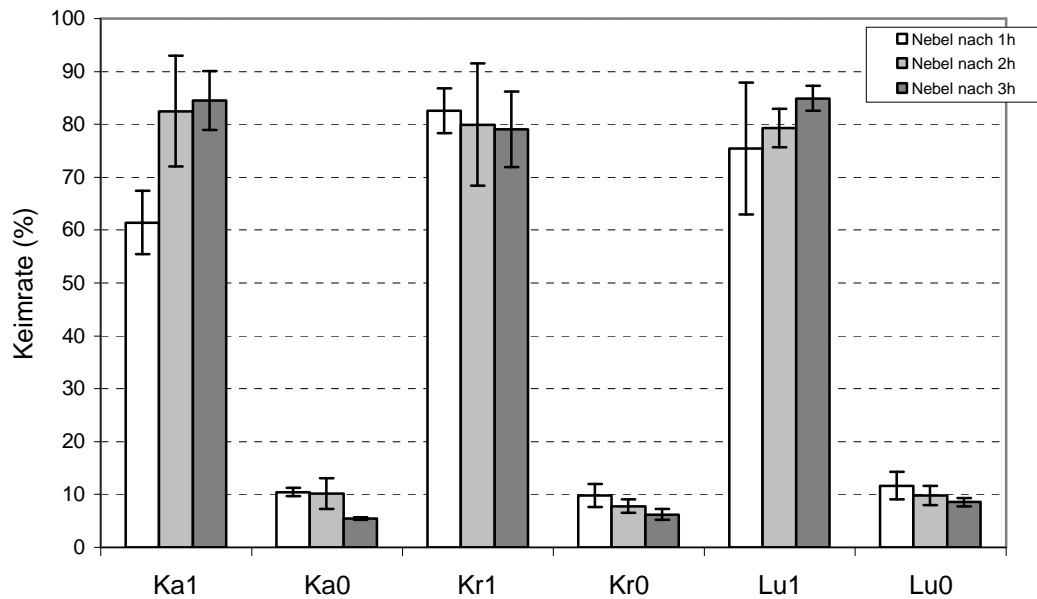


Abb. 4.19: Keimrate in Abhängigkeit der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beneblung und der Wachstruktur. Sorten: Ka = Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0 = zerstörte Wachse

Keimrate nach simulierter Beregnung

Aufgrund der insgesamt extrem geringen Restbelegung mit Konidien nach Beregnung bei allen Zeitintervallen wurde eine prozentuale Auswertung der Keimraten als nicht sinnvoll erachtet.

Einfluss der Faktoren Wachs (intakt/zerstört) und Sorte auf die Anzahl der Konidien bei simulierter Beneblung

Die Ergebnisse der Keimraten erwiesen sich als unabhängig von den verwendeten Sorten (Tab. 4.4). Als hoch signifikant ($p < 0,001$) zeigte sich dagegen der Einfluss des Faktors Wachs (intakt/zerstört) auf die Keimrate.

Tab. 4.4: Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen: Auswirkung der Faktoren Wachs (intakt/zerstört) und Sorte auf die Konidienanzahl (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns nicht signifikant)

Intervall Inokulation - Nebel	R2 [%]	Faktoren	
		Sorte	Wachs intakt/zerstört
1 Stunde	98	ns	***
2 Stunden	96.4	ns	***
3 Stunden	99.2	ns	***

Einfluss der Faktoren Wachs (intakt/zerstört) und Sorte auf die Anzahl der Konidien bei simulierter Berechnung

Weniger deutlich waren die Ergebnisse zum Einfluss der Faktoren Wachs und Sorte auf die Anzahl der Konidien nach simulierter Berechnung (Tab. 4.5). Während sich für den Faktor Sorte in keinem der Fälle ein signifikanter Einfluss ergab, war das Ergebnis in Bezug auf den Faktor Wachs (intakt/zerstört) heterogen. Nur für den 2h Intervall konnte ein signifikanter Einfluss der Struktur (Wachs) auf die Keimrate festgestellt werden.

Tab. 4.5: Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen: Auswirkung der Faktoren Wachs (intakt/zerstört) und Sorte auf die Konidienanzahl (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ns nicht signifikant)

Intervall Inokulation - Regen	R2 [%]	Faktoren	
		Sorte	Wachs intakt/zerstört
1 Stunde	26,7	ns	ns
2 Stunden	96,5	ns	***
3 Stunden	13,2	ns	ns

4.4 Diskussion

Da Weizen weltweit eine der wichtigsten Kulturpflanzen darstellt, wurden bereits viele Untersuchungen über die spezifischen Krankheitserreger und ihre Bekämpfung durchgeführt. Eine ausführliche Auflistung der verschiedenen Krankheiten und ihrer Auswirkungen findet sich bei Wiese (1991).

Die Kutikula mit ihren aufgelagerten Wachsen bildet die erste „Verteidigungslinie“ der Pflanzen gegenüber Pathogenen (Carver *et al.*, 1996; Martin, 1964). Trotzdem wurde bislang nur in wenigen Arbeiten auf den Zusammenhang zwischen Oberflächenfunktionen und Pathogenbefall eingegangen. In einigen Experimenten sind die epikutikularen Wachse sogar als störend eingestuft worden und wurden für die Untersuchungen entfernt (Bélanger *et al.*, 2002). In einem solchen Fall wird jedoch die Barrierewirkung des Abschlussgewebes der Pflanzen empfindlich gestört. So wird beispielsweise unmittelbar nach der Entfernung die kutikulare Transpiration deutlich erhöht (Neinhuis *et al.*, 2001; Riederer & Schreiber, 2001). Wie wichtig die epikutikularen Wachse für die Unbenetzbarkeit und Selbstreinigung sind, belegen die gezeigten Ergebnisse.

Unbenetzbarkeit der Weizenblätter

Bereits Troughton & Hall (1967) und Holloway (1969a) zeigten, dass Weizen extrem unbenetzbar ist. Netting & von Wettstein-Knowles (1973) untersuchte in diesem Zusammenhang die Bedeutung der epikutikularen Wachse. Die in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Kontaktwinkel lagen zum Teil sogar noch leicht über den bereits publizierten Daten. Bei der Messung der Kontaktwinkel konnte die extreme Unbenetzbarkeit der Oberflächen beobachtet werden. Häufig rollten die Tropfen nach dem Ablösen von der Pipette ungehindert ab. Gemäß aktuellen Studien zur Unbenetzbarkeit (bsp. Quéré, 2002a; Yoshimitsu *et al.*, 2002; Marmur, 2004) ist demnach Weizen als superhydrophob zu bezeichnen. Damit ist eines der wichtigen Kriterien für Selbstreinigung bereits erfüllt.

Durch die Zerstörung der Wachskristalle wurde in allen Fällen der Kontaktwinkel signifikant niedriger. Dies entspricht den Ergebnissen von Holloway (1969a), der auch glatte Filme von Weizenwachsen untersucht hatte. Die Kontaktwinkel lagen alle im Bereich von 110° , was wiederum belegt, dass die Wachschemie eine hohe Hydrophobie hervorruft. Holloway (1970) zeigte ebenfalls, dass nur beim Vorhandensein von Wachsfilmen auf der Kutikula solch hohe Youngs-Kontaktwinkel

erreicht werden können. Neben den REM-Bildern (Abb. 4.2), war dies ein deutlicher Hinweis darauf, dass durch den Wischprozess in dieser Untersuchung tatsächlich nur die Struktur der Wachse zerstört wurde, die Wachse jedoch nicht vollständig von der Oberfläche entfernt wurden.

Effizienz der Selbstreinigung von Weizenblättern

Da im Selbstreinigungstest nahezu alle Partikel von den intakten Weizenoberflächen entfernt wurden, ist Weizen als selbstreinigend zu bezeichnen. Es verblieben sogar weniger Restpartikel auf den Oberflächen, als beispielsweise bei Untersuchungen mit Lotus (*Nelumbo nucifera*), der als Paradebeispiel für selbstreinigende Oberflächen gilt (vgl. Barthlott & Neinhuis, 1997). Die Gründe dafür liegen in der Kombination der Topologie der Oberfläche und dem simulierten Niederschlagsereignis. Die eingesetzte Beneblung entspricht einem Niederschlagsereignis mit sehr geringer kinetischer Energie. Die winzigen Nebeltröpfchen mit Durchmessern von 8-20 μm sinken nur langsam auf die Oberflächen ab. Dabei bleibt die zusätzliche Reinigungswirkung, die durch das schlagartige Zerstäuben der Tropfen auf einer Oberfläche bei Regen entsteht, vollständig aus. Die abgesetzten Tropfen liegen zunächst sogar auf der Oberfläche, da sie zu klein sind, um von der Gravitation heruntergerissen zu werden. Durch Koaleszenz bilden sich immer größere Tropfen auf der Oberfläche, bis ein Volumen erreicht wird, bei dem die Gravitation die Tropfen abrollen lässt. Allein bei diesem Prozess erfolgt die Reinigung der Oberflächen. Da die Weizenoberfläche aus elongierten konvexen Zellen besteht, erreichen die Wassertropfen beim Ablaufen nahezu alle auf der Oberfläche liegenden Schmutzpartikel. Dagegen besteht die Oberfläche von Lotus (*N. nucifera*) aus unzähligen, dicht beisammen stehenden Zellpapillen (Wagner *et al.*, 2003). Größere Nebeltropfen vermögen nicht in die Zwischenräume der Papillen einzudringen, sondern bleiben auf den Spitzen liegen. In den Zwischenräumen befindliche Schmutzpartikel werden deshalb nicht von der Oberfläche abgereinigt. Auf diese Weise ergibt sich der Unterschied in der Effizienz der Selbstreinigung bei Beneblung zwischen Weizen und Lotus. Dieses Phänomen wurde von Barthlott & Neinhuis (1997) auch in Untersuchungen bei *Brassica oleracea* beobachtet. Das Fehlen einer deutlich ausgeprägten Sekundärstruktur, beispielsweise in Form von Zellpapillen, ermöglicht eine höchst effiziente Selbstreinigung allein durch Nebel.

Auf den Weizenoberflächen mit zerstörten Wachskristallen wurde eine 10-30-mal höhere Restbelegung mit Kontaminanzen festgestellt. Auf der flachen Wachsoberfläche

ist die Adhäsion zwischen den Partikeln und der Oberfläche allein aufgrund der größeren Kontaktfläche stark erhöht (Barthlott & Neinhuis, 1997; Burton & Bhushan, 2006). Dies führt letztlich dazu, dass die Wassertropfen über die Kapillarkräfte die Schmutzpartikel nicht mehr an sich binden können und eine Abreinigung unterbleibt.

Abreinigung von *B. graminis*-Konidien mittels simulierten Niederschlägen

In dieser Untersuchung konnte erstmals eine hohe Effizienz der Abreinigung von Konidien über Niederschläge bei Weizen nachgewiesen werden. Diese Selbstreinigung ist, wie bereits zuvor beschrieben, auf die besondere Struktur der Oberfläche zurückzuführen und eng mit der extremen Unbenetzbarkeit der Oberfläche gekoppelt.

Die Ergebnisse der Abreinigung von Konidien mittels Nebel stimmen weitgehend mit den Ergebnissen des Selbstreinigungstests überein. Auf den Oberflächen mit intakten Wachsen wurden deutlich geringere Mengen an Konidien gefunden als auf den Oberflächen mit zerstörten Wachskristallen. Die hohen Abreinigungsraten des Selbstreinigungstests wurden indes nicht erreicht. Ein möglicher Grund könnte darin liegen, dass die extrazellulären polymeren Substanzen, die von den Konidien bereits kurz nach dem Kontakt gebildet werden (Kunoh *et al.*, 1988; Nicholson *et al.*, 1988), die Adhäsion deutlich erhöhen und die Kapillarkräfte teilweise nicht mehr ausreichen, um eine Abreinigung zu bewirken.

Wie zu erwarten war, wusch eine Regensimulation deutlich mehr Konidien von den Oberflächen ab als eine Nebelsimulation. Unterschiede zwischen den Oberflächen mit intakten und zerstörten Wachsen waren kaum mehr vorhanden. Aufgrund der höheren Kinetik der Tropfen und der größeren eingesetzten Wassermenge (150-mal mehr als bei Beneblung) wurden unabhängig von der Struktur nahezu alle Konidien von den Oberflächen abgewaschen. Signifikant geringere Mengen an Konidien nach einem Regenereignis auf intakten Weizenblättern im Vergleich zu Blättern mit zerstörten Wachsen fanden bereits auch Merchán & Kranz (1986b).

Bei keiner der Untersuchungen, weder bei Nebel noch bei Regen konnte ein Unterschied zwischen den Weizensorten festgestellt werden, obwohl unterschiedliche Anfälligkeiten gegenüber Mehltau vorlagen und zwei der Sorten Resistenzgene besaßen. Dies unterstreicht die Bedeutung der Kutikula mit ihren epikutikularen Wachsen als eine rein physikalische Barriere. Nachgeschaltete physiologische Prozesse der Pflanzen spielen dabei in den ersten drei Stunden offenbar nur eine untergeordnete Rolle. Der

einzigste hoch signifikante Parameter (bei simulierter Beneblung), der für den Selbstreinigungsprozess wichtig war, war die Intaktheit der Oberflächenstruktur.

Abreinigung von Konidien in Abhängigkeit des Zeitintervalls zwischen Inokulation und Niederschlag

Auch die Frage, ob die Zeit zwischen Inokulation und Niederschlagsereignis für die erfolgreiche Etablierung von *B. graminis* auf der Oberfläche eine Rolle spielt, konnte beantwortet werden. Bei „Kris“ und „Ludwig“ wurde in den Experimenten mit Nebel ein signifikanter Anstieg der verbliebenen Konidien registriert, wenn erst nach zwei oder drei Stunden benebelt wurde. Dies kann mit dem bereits gut untersuchten Infektionsprozess erklärt werden. Schon in den ersten Minuten nach der Landung auf einer Weizenoberfläche beginnen die Konidien mit der Produktion von extrazellulärem Material (EPS). Dieses enthält Proteine, wie eine nicht spezifische Esterase (Nicholson *et al.*, 1988). Weitere 15 Minuten nach dem Kontakt wird erneut EPS ausgeschieden. Inzwischen ist man sich sicher, dass die Esterasen hauptsächlich zur Degradation der epikutikularen Wachse und der Kutikula dienen. Dieses Material erhöht zudem die Adhäsion zwischen Konidie und Oberfläche, um eine Wiederablösung zu erschweren oder zu verhindern (Epstein & Nicholson, 1997; Kunoh *et al.*, 2001; Nicholson & Epstein, 1991; Meguro *et al.*, 2001; Pascholati *et al.*, 1992; Wright *et al.*, 2002a). Nach 45-50 Minuten bildet *B. graminis* einen primären Keimschlauch, der unter anderem die Adhäsion zur Oberfläche erhöht (Carver *et al.*, 1995b; Green *et al.*, 2002). Die erst viel spätere Bildung von Appressorien (ca. 8-9 Stunden nach der Landung) spielt für diese Untersuchung keine weitere Rolle. Die höhere Konidienzahl auf Oberflächen, die erst nach zwei oder drei Stunden benebelt wurden, kann deshalb auf die höhere Adhäsion durch die Bildung von EPS und die Keimschläuche zurückgeführt werden. Auch bei „Kanzler“ wurde eine, wenn auch nicht signifikante, Zunahme der verbliebenen Konidien beobachtet.

Zu einem ähnlichen Ergebnis, dass Konidien im Verlauf der Zeit zunehmend stärker an Oberflächen anhaften, kamen auch Nicholson & Epstein (1991).

Die Diskussion über die Anzahl der verbliebenen Konidien nach Beregnung der Oberflächen ist schwieriger, da die Anzahl der Konidien 2 Stunden nach Inokulation bei allen Sorten ungewöhnlich hoch lag. Generell verblieben nur sehr wenige Konidien nach einem simulierten Regen auf den Oberflächen. Bei allen Oberflächen mit intakten Wachskristallen lag die Anzahl der verbliebenen Konidien deutlich unter 10%.

Während bei den Zeitspannen 1h und 3h, die Restbelegung auf allen Sorten mit intakten Wachsen im Bereich um 1% lagen, wurde bei der Beregnung 2h nach der Inokulation in allen Fällen eine Restbelegung von ~ 4% gefunden. Dieser Unterschied könnte auf eine ungewöhnlich schwache Beregnung zurückgeführt werden. Da die Beregnung manuell erfolgte und sowohl das Eingießen der Flüssigkeit in das Beregnungsgefäß wie auch die Bewegung der Probe zeitgleich erfolgen musste, könnte hier ein Fehler beim Beregnungsvorgang unterlaufen sein. Es wäre möglich, dass beispielsweise zu Beginn des Beregnungsprozesses zunächst das Wasser an der Probe vorbei geregnet und damit die Regenmenge geringer ausgefallen ist. Ein weiterer, nicht zusätzlich kontrollierter Parameter konnte ebenfalls nicht ausgeschlossen werden: die Intaktheit der Oberfläche. Im Nachhinein konnten die Ursache für die deutlich höheren Belegungsraten in diesem Experiment nicht aufgeklärt werden.

Prinzipiell wurden, wie zu erwarten war, durch künstlichen Regen deutlich mehr Konidien abgewaschen als bei Beneblung der Proben. Eine solche Abreinigung mit Regen wurde auch bis zum Zeitpunkt der Bildung der Appressorien von Holthuis *et al.* (1990) beobachtet.

Als Gründe für den Widerspruch zwischen effizienter Selbstreinigung einerseits und starkem Befall andererseits können mehrere Ursachen benannt werden. Unter natürlichen Bedingungen werden epikutikulare Wachse verschiedenen Einflüssen ausgesetzt, die ihre Funktionalität herabsetzen können. In einem Getreidefeld reiben die Blätter und Halme bei Wind aneinander. Dadurch werden die Wachse erodiert und zerstört. Auch Regen verursacht eine Schädigung der Wachse und kann zu einer deutlichen Reduktion der Unbenetzbarkeit und damit der Selbstreinigung führen (Baker & Hunt, 1986; Cleugh *et al.*, 1998; Shepherd & Griffiths, 2006; Wilson, 1984). Spritzmittel sind ebenfalls dafür bekannt, dass sie zu einer Schädigung der Wachse führen können (Kuzych & Meggitt, 1983; Noga *et al.*, 1991). Dass dadurch die Gefahr von Krankheiten steigen kann, wurde bereits für *Brassica oleracea* gezeigt (Neinhuis *et al.*, 1992; Noga *et al.*, 1990).

Der wahrscheinlich wichtigste Grund für den Erfolg von *B. graminis* bei der Infektion von *T. aestivum* liegt in seiner evolutiven Anpassung an solche Oberflächen. Die meisten Pilzsporen benötigen für ihre Keimung Wasser und so lange dieses nicht vorhanden ist, überdauern sie ruhend auf pflanzlichen Oberflächen (Juniper, 1991). Auf superhydrophoben Oberflächen findet sich kein Wasser, das für die Keimung zur Verfügung stehen würde. Sowohl die Trockenheit, wie auch die Selbstreinigung bei

Niederschlägen stellen einen effizienten Schutz gegenüber Pathogenen dar. Mehltauerreger können diese Barriere jedoch umgehen, da sie einen Wasservorrat für die Keimung bereithalten (Yarwood, 1950) und selbst bei geringen Luftfeuchtigkeiten keimen können (Brodie, 1945; Manners & Hossain, 1963). Zudem finden die Keimung und damit die Etablierung bereits wenige Minuten nach der Landung auf den Oberflächen statt. Ein Niederschlagsereignis müsste daher innerhalb einer nur sehr kurzen Dauer auftreten, damit noch eine Abreinigung möglich wäre. Eine weitere besondere Anpassung der Pilze brachte ihnen auch die Bezeichnung „Dry Weather Fungi“ ein (Yarwood, 1950), da ihre Konidien besonders bei Trockenheit in der Luft nachgewiesen werden können (Ingold, 1978). Im Gegensatz dazu werden Konidien von Arten, die nicht zu den echten Mehltaupilzen gehören, besonders bei höheren Luftfeuchtigkeiten verbreitet (Main & Davis, 1989). Bei solchen Umgebungsbedingungen kommt es sogar zur Schädigung von Mehltaupilzen (Schwinn & Dahmen, 1973).

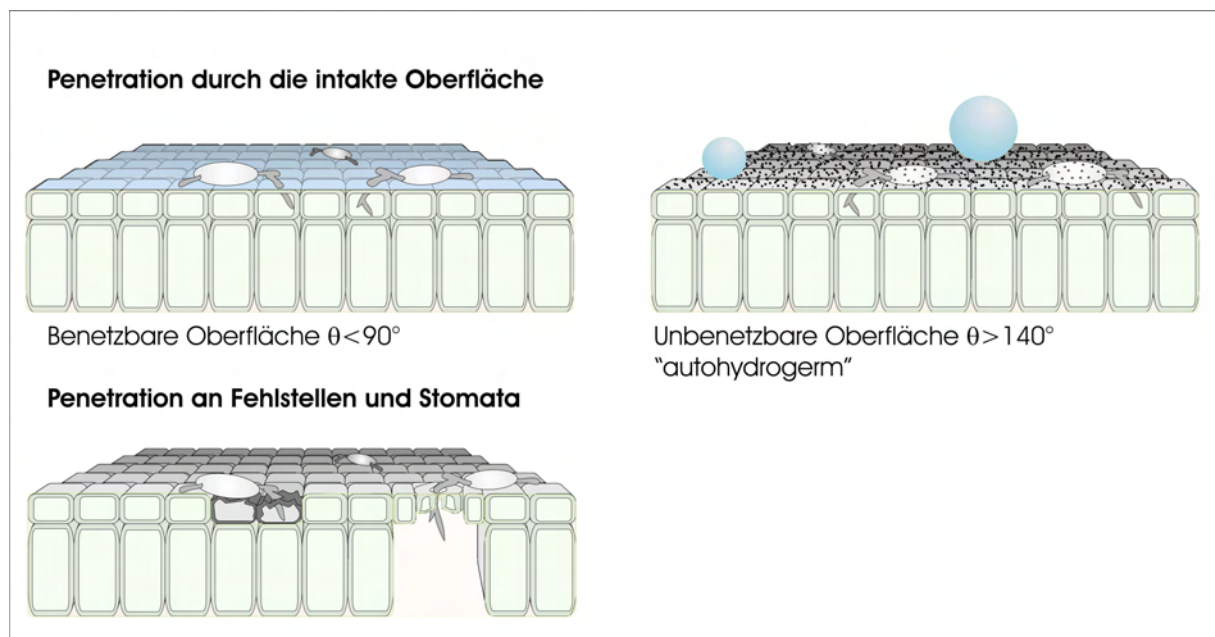


Abb. 4.20: Mögliche Infektionswege, wie Pilze pflanzliche Oberflächen penetrieren. Auf superhydrophoben Oberflächen bedarf es eines eigenen Wasservorrats für Keimung und Penetration.

Die drei Faktoren eigener Wasservorrat, hohe Geschwindigkeit beim Infektionsprozess und bevorzugte Verbreitung bei Trockenheit (Kunoh, 1981; Nicholson & Kunoh, 1995; Yarwood, 1950) machen es *B. graminis* möglich, die physikalische Barriere der selbstreinigenden Oberflächen erfolgreich zu überwinden. Die Infektion von Pflanzen mit unbenetzbaren Oberflächen stellt eine besondere Herausforderung an Pilze dar.

Wenn kein Eindringen entweder an Fehlstellen oder über die Stomata erfolgt (Howard, 1997; Read *et al.*, 1997), müssen Keimung sowie Penetration der Oberfläche mit eigenem Wasservorrat erfolgen (Yarwood, 1950). Diese besondere Art der Keimung könnte auch als „autohydrogerm“ bezeichnet werden. Auf benetzbaren Oberflächen hingegen steht meist hinreichend Wasser für die Keimung und die Penetration zur Verfügung (Abb. 4.20).

Keimrate von *B. graminis* auf Weizen in Abhängigkeit der Oberflächenstruktur

Auf intakten Oberflächen keimten deutlich mehr Konidien aus, als auf den Oberflächen mit zerstörten Wachskristallen. Ähnliches beobachteten Carver & Ingerson (1987), Carver *et al.*, (1996) und Yang & Ellingboe (1972), die das Keimungsverhalten von *B. graminis* auf unterschiedlichen künstlichen, aber auch auf Blattoberflächen mit abgelösten Wachsen untersuchten. Sie konnten zeigen, dass es während der Keimung zu Fehlbildungen bei Appressorien kommen kann. In weiteren Arbeiten behaupten Carver & Thomas (1990) und Carver *et al.* (1995b), dass keine Änderung des Keimverhaltens in Abhängigkeit der Struktur der Oberfläche vorliegt. Für einige Untersuchungen wurden Wachse zuvor abgelöst (Carver *et al.*, 1995a; Wright *et al.*, 2002b), um so zu zeigen, dass, die Hydrophobie, ebenso wie die Chemie der Oberfläche ausschlaggebend für das normale Keimverhalten von *B. graminis* ist. Das Gegenteil wies Holthuis (1989) bei Gerste mit *B. graminis* var. *hordei* nach: Seine Versuche belegten die Bedeutung der intakten epikutikularen Wachse für das Keimverhalten.

In der vorliegenden Untersuchung wurden auf den Oberflächen mit abgewischten Wachsen vermehrt abnormal gekeimte Konidien gefunden, obwohl nachweislich eine noch sehr hohe Hydrophobie vorlag und nicht anzunehmen war, dass die Chemie der Oberfläche verändert worden war. Konidien auf diesen Oberflächen wiesen zum Teil fünf bis sieben kurze Keimschläuche auf (Abb. 4.21). Das Ergebnis, dass deutlich mehr Konidien auf intakten Wachsen als auf zerstörten Wachsen keimten und die Beobachtung, dass auf den zerstörten Wachsen häufiger fehlgebildete Keimschläuche zu finden waren, legt den Schluss nahe, dass die Oberflächenstruktur eine wichtige Information für die Keimung enthalten könnte. Ähnliche Vermutungen äußerten bereits Wynn (1981), Hoch & Staples (1991) und Wright *et al.*, (2000), die einige Pflanzenpathogene untersuchten, die offenbar in der Lage waren, auf topographische Begebenheiten der Oberflächen zu reagieren. Vielleicht könnte dies auch für *B.*

graminis gelten, obwohl das Ergebnis im Widerspruch zu den von Carver & Thomas (1990) und Carver *et al.* (1995b) publizierten Daten stehen würde. Weiterführende Untersuchungen mit künstlichen, ähnlich wie *T. aestivum* strukturierten Oberflächen könnten zur Klärung dieser Frage beitragen.

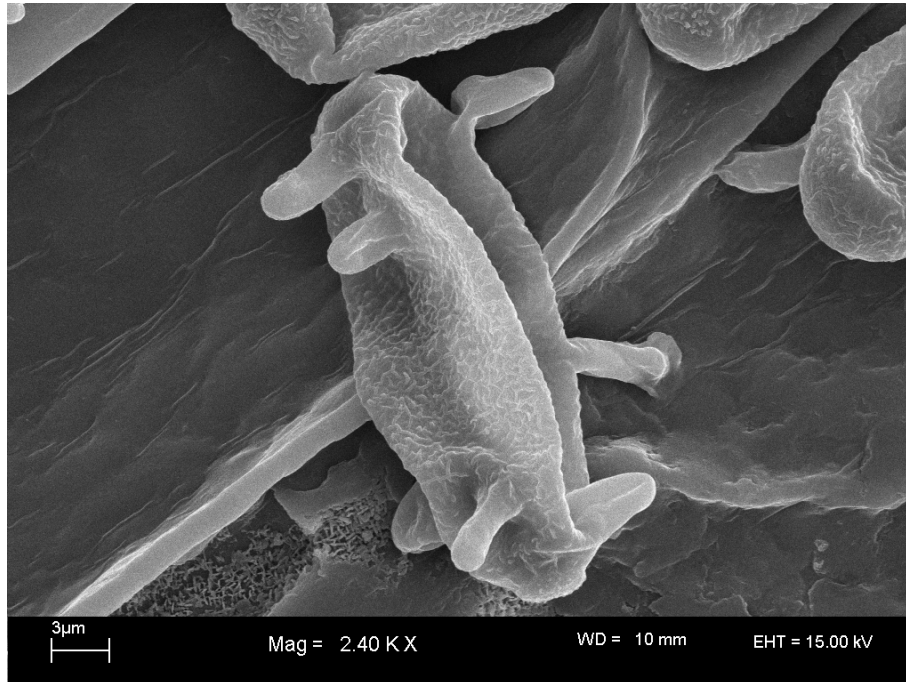


Abb. 4.21: Konidie von *B. graminis* auf der Oberfläche von *T. aestivum* cv. „Kanzler“ mit abgewischten Wachsen (Trockenpräparat). Deutlich sind sieben kurze „abnormale“ Keimschläuche zu erkennen.

Belegungswerte über 100%

Betrachtet man die Belegung der Weizenoberflächen mit Konidien im Vergleich zu der Referenzbelegung, fällt auf, dass auf den Weizenoberflächen mit zerstörten Wachsen nach der Beneblung deutlich mehr Konidien vorhanden waren, als auf den nicht benebelten Referenztellern. Zum Teil wurden Einzelwerte von $>160\%$ erreicht. Für diesen Umstand können mehrere Ursachen in Betracht gezogen werden

Auf Oberflächen, die keine selbstreinigenden Eigenschaften besitzen, führen die eintrocknenden Tropfen an einigen Stellen zu einer Aufkonzentration der Konidien. Werden zufällig genau diese Stellen ausgewertet, kann die Konidienbelegung deutlich höher ausfallen als auf den Referenztellern mit homogen verteilten Konidien. Ein ähnliches Phänomen bei nicht selbstreinigenden Oberflächen beobachtete bereits Fürstner (2002) (vgl. dort Abb. 4.26 auf Seite 97) bei Selbstreinigungstests. Da jedoch die zu untersuchenden Stellen zufällig ausgewählt wurden, hätte sich der Effekt nicht

derart stark auswirken dürfen. Statistisch hätten entsprechend der Aufkonzentration auch Stellen mit deutlich weniger Konidien vorkommen müssen. Es wäre zu erwarten, dass, falls die Aufkonzentration die Ursache für einzelne hohe Belegungsdichten wäre, die Konidienbelegung im Bereich von 100% läge, aber vor allem die Standardabweichung entsprechend groß wäre. Aus diesem Grunde kann dieser Effekt nicht allein für die hohen Belegungsraten verantwortlich sein.

Die hohen Belegungsraten stehen wahrscheinlich in Zusammenhang mit dem Verstäubungsprozess. In den Versuchen wurde davon ausgegangen, dass eine einfache Sedimentation der Konidien stattfand. Dabei wurde nicht berücksichtigt, dass Konidien auch Ladungsträger sein können (Gregory, 1957). Konidien sind dafür bekannt, dass ihre Oberfläche eine negative Ladung besitzt (Moriura *et al.*, 2006). Durch den Verstäubungsprozess könnten zudem Kollisionen die Aufladung noch verstärkt haben. Da wiederum pflanzliche Oberflächen positiv geladen sein können (Leach & Apple, 1984), ist denkbar, dass Konidien bevorzugt auf den Weizenoberflächen und nicht auf den Referenztellern gelandet sind. Inhomogenitäten in der Verteilung der Konidien in der Kammer können nicht Ursache für die unterschiedlichen Belegungen sein, da von Versuch zu Versuch die Anordnung der Weizenproben und Referenzsteller in der Verstäubungskammer variierte.

Ein noch zusätzlicher Effekt hätte die Konzentration der Konidien auf den Proben zu Ungunsten der Referenzsteller verschieben können. Wie bereits oben beschrieben, finden auf hydrophoben Oberflächen aktive adhäsive Prozesse bereits kurz nach der Landung der Konidien statt. Zwar wurde davon ausgegangen, dass die klebrigen REM-Leitpads ein Haften der Konidien an der Oberfläche bewirken. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Adhäsion auf den Leitpads deutlich geringer ausfiel als auf den Weizenoberflächen, wo aktiv EPS abgesondert wurden, welche die Adhäsion erhöhen. Wenn die Konidien eine geringere Haftung auf den Referenztellern besaßen, hätte auch der Sputterprozess beim Einschalten des Vakuums zum Herunterwehen und Absaugen der Konidien führen können.

4.5 Folgerungen

Obwohl zahlreiche Untersuchungen über Resistenzen, über phytochemische Reaktionen oder über die Wirksamkeit von Spritzmitteln existieren, ist der Oberfläche als eine rein physikalische Barriere für Pathogene bislang verhältnismäßig wenig Beachtung geschenkt worden. Neben einer außerordentlich hohen Unbenetzbarkeit

besitzt die Oberfläche von Weizen auch selbstreinigende Eigenschaften, die unter günstigen Bedingungen einen effektiven Schutz vor Mehltau darstellen (Stosch *et al.*, 2007).

Für zukünftige Untersuchungen sollte für eine bessere Vergleichbarkeit auf Weizenoberflächen als Referenzbelegungsteller zurückgegriffen werden, um den möglichen Effekt der elektrostatischen Anziehung der Konidien mit zu berücksichtigen. Trotz der effizienten Selbstreinigung umgehen Mehltau verursachende Pilze, wie *B. graminis*, die Schutzbarriere der Oberfläche. Im Laufe der Evolution haben sie Anpassungen gefunden, die dennoch einen effektiven Befall unbenetzbarer Oberflächen ermöglichen. Eine Etablierung wird durch folgende Anpassungen ermöglicht:

1. Vorhandensein eines eigenen Wasservorrats der Konidien für Keimung auf den sonst trockenen Oberflächen.
2. Schnelle Erkennung der Oberfläche und Erhöhung der Adhäsion, um ein Wiederablösen auf den antiadhäsiven Oberflächen zu unterbinden.
3. Beschleunigte Keimung, die das Risiko von Niederschlägen abgewaschen zu werden minimiert.
4. Verbreitung überwiegend bei Trockenheit, die das Risiko von Niederschlägen noch weiter reduziert

Noch ungeklärt ist die Funktion der Oberfläche als Signal für das Keimverhalten. Während in der Literatur hauptsächlich Hinweise auf die Chemie als Auslöser für die Keimung zu finden sind, legen die hier vorgelegten Ergebnisse einen deutlichen Einfluss der Struktur nahe. Dieser Aspekt erfordert noch weitergehende Untersuchungen.

Für die Kultur von Weizen ergibt sich aus den Ergebnissen eine mögliche Schlussfolgerung. Würden geringe Wassermengen periodisch, besonders an trocknen Tagen, im Bestand vernebelt, könnte die Befallswahrscheinlichkeit für echten Mehltau deutlich verringert werden. Dabei würden synoptisch mehrere Effekte wirken: die Selbstreinigung der Oberflächen, eine Schädigung der Konidien durch Feuchtigkeit sowie eine Verringerung der Neubildung und Freisetzung von Konidien. Ähnliche Ansätze wurden beispielsweise von Jarvis & Slingsby (1977) für die Kontrolle des Befalls von Gurken mit Mehltau vorgeschlagen. Ob jedoch dadurch die Wahrscheinlichkeit für den Befall mit anderen Pathogenen steigen würde, müssten entsprechende Versuche erst zeigen.

5. Modellsystem Lotus und Mehltau: Auswirkungen von Niederschlägen auf den Befall unter Freilandbedingungen

In den Botanischen Gärten Bonn werden seit vielen Jahren Lotuspflanzen (*Nelumbo nucifera*) im Freiland kultiviert. Bereits wenige Wochen nach dem Austreiben im Frühsommer kann im Bestand an einigen Blättern Pilzbefall beobachtet werden. Obwohl die Blätter der Lotuspflanzen nach allen bisherigen Untersuchungen (Barthlott & Neinhuis, 1997; Neinhuis & Barthlott, 1997) mit zu den besten selbstreinigenden pflanzlichen Oberflächen gehören, scheint es einem Pilz zu gelingen, den Selbstreinigungsmechanismus zu umgehen und die Blätter zu infizieren. Auch in diesem Fall ist es interessant zu wissen, ob es sich dabei um eine besondere ökologische Anpassung des Pilzes handelt oder ob generell eine „Lücke“ im System der Selbstreinigung besteht, die von Mikroorganismen zur Besiedlung der Oberflächen ausgenutzt werden kann. Diese Frage ist von zentraler Bedeutung, da beim Einsatz selbstreinigender Oberflächen in der Technik mögliche „Besiedlungsfenster“ bekannt sein sollten. Ausgehend von der Beobachtung, dass besonders Blattstellen befallen werden, die von anderen Blättern überdeckt sind und damit selten bei Regen überspült werden, wurde der Frage nachgegangen, welche Rolle Niederschläge für den Befall spielen. Dies wurde in einem Freilandexperiment überprüft.

5.1 Die Lotuspflanze: Synonym für Selbstreinigung

Zwar wurden die ersten Arbeiten über die Selbstreinigung von Blättern nicht an *N. nucifera* durchgeführt (Barthlott & Wollenweber, 1981), spätere Versuche zeigten jedoch, dass sowohl die Unbenetzbarkeit, wie auch die selbstreinigenden Eigenschaften bei Lotus extrem ausgeprägt sind (Barthlott & Neinhuis, 1997; Neinhuis & Barthlott, 1997; Wagner *et al.*, 2003). Die Lotuspflanze wird zudem im Buddhismus seit mehr als 2000 Jahren als Symbol der Reinheit verehrt (Ward, 1952). Beides führte dazu, dass sich die Lotuspflanze in den letzten Jahren zu einem Synonym für Selbstreinigung entwickelt hat und entsprechend in den Fokus wissenschaftlicher Arbeiten zur Selbstreinigung und Unbenetzbarkeit gerückt ist (Bhushan & Jung, 2006; Burton & Bhushan, 2005; Jung & Bhushan, 2006; Lai, 2003; Marmur, 2004; Patankar, 2004b; Riedewald, 2006; Rosario *et al.*, 2004; Rossbach *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2005a; Zhang *et al.*, 2006c; Zhao *et al.*, 2006).

Obwohl einige pflanzliche Oberflächen einen ähnlichen hierarchischen Aufbau besitzen wie *N. nucifera*, erreichen diese kein vergleichbares antiadhäsives Verhalten. Lotus ist nicht nur durch einen hohen Kontaktwinkel und einen geringen Abrollwinkel gekennzeichnet, die Unbenetzbarkeit ist gleichzeitig gegenüber mechanischen Beschädigungen verhältnismäßig stabil (Gao & McCarthy, 2006a).

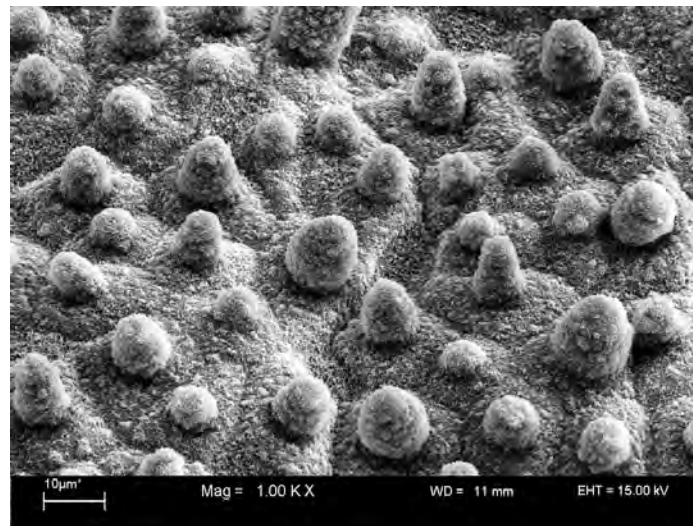


Abb. 5.1: REM-Aufnahme von *N. nucifera*. Charakteristisch ist die große Anzahl von kegel- bis ellipsenförmigen Zellpapillen, die mit epikutikularen Wachskristallen vollständig überzogen sind.

Die Zellen der Blattoberfläche von Lotus sind überwiegend isodiametrisch-polygonal (hexagonal), konvex geformt und mit einer zentralen ellipsenförmigen Papille (Wagner *et al.*, 2003) (Abb. 5.1). Die gesamte Oberfläche ist dicht mit Wachskristallen in Röhrenform bedeckt (Koch *et al.*, 2006a). Welche Besonderheit der Oberfläche von *N. nucifera* für die herausragenden Eigenschaften verantwortlich ist, wird in der Literatur derzeit diskutiert. Im Fokus stehen dabei die Form der Papillen (Patankar, 2004b), die Anzahl der Papillen pro Fläche (Wagner *et al.*, 2003) und der Abstand der Strukturen (Burton & Bhushan, 2006).

Die Schutzwirkung der Oberfläche gegenüber Mikroorganismen, im Besonderen Pathogenen, wurde bislang nicht untersucht.

5.2 Pathogene von *Nelumbo nucifera*

Zu möglichen Pathogenen von *N. nucifera* existieren bislang nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen. Aus Japan wurde der Pilz *Erysiphe takamatsui* (Nomura, 1997) auf Lotus beschrieben. Weitere Pilze wie *Erysiphe polygoni*, aber auch

Pilze, die nicht den Mehltapilzen zuzuordnen sind, werden in dem Bericht der Rural Industries Research and Development Corporation, (Nguyen, 2001) aufgezählt. Weitergehende Untersuchungen beispielsweise zur Wirt-Pathogen-Beziehung dieser Pilze auf Lotus sind nicht bekannt.

5.3 Material und Methoden

Pflanzen

Für die Versuche wurde *Nelumbo nucifera var. lutea* verwendet. Das Pflanzenmaterial wurde in den Botanischen Gärten Bonn in vier handelsüblichen 40 L Kunststoffkübeln für den Versuch angezogen und kultiviert. Nach der Winterruhe wurden die Kübel im Mai aus den Gewächshäusern nach draußen gestellt. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits erste aus dem Wasser ragende Blätter vorhanden.

Da in einem Kübel mehr als nur ein Blatt austrieb, für die Untersuchung jedoch nur eines über die Wochen hinweg beobachtet wurde, musste das zu untersuchende Blatt von den übrigen isoliert werden. Um die gesamte Pflanze nicht unnötig zu schwächen, wurden die Blätter nicht weggeschnitten, sondern mit Kordel vorsichtig vom Untersuchungsblatt auf Distanz gehalten. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine Abschattung oder ein Überwachsen des Untersuchungsblattes erfolgte. Um eine gleichmäßige Ausrichtung aller Untersuchungsblätter zu gewährleisten, wurden diese waagrecht fixiert. Die Fixierung erfolgte mit Hilfe eines Holzstabes und eines Drahrings (Abb. 5.2). Dieser unterhalb des Blattes verlaufende Drahring diente als Stütze und ermöglichte auch während der laufenden Untersuchung immer wieder eine Korrektur der Justierung. Die Arretierung verhinderte, dass sich ein Regenereignis je nach Blattstellung unterschiedlich stark auswirkte. Zudem wurde auf diese Weise ein Einfluss unterschiedlicher Neigungswinkel auf die potenzielle Kontaminationsfläche vermieden.

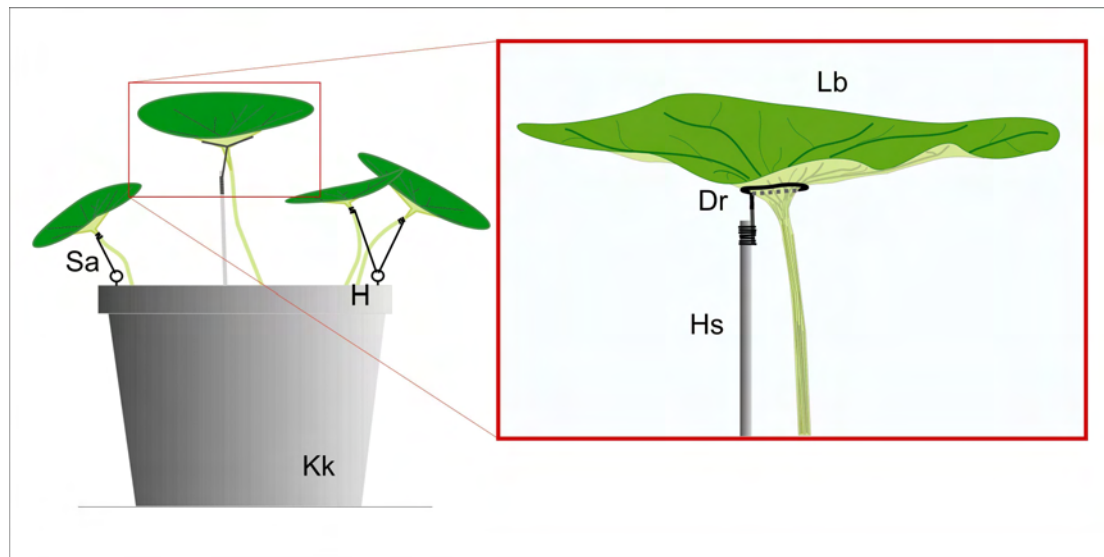


Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Arretierung der Lotusblätter. Dr: Drahtring; H: Haken; Hs: Holzstab; Kk: Kunststoffkübel; Lb: Lotusblatt; Sa: Seilarretierung.

Versuchszeiträume

Frühere Beobachtungen des Pilzbefalls von Lotus ließen einen Zusammenhang mit dem jahreszeitlichen Verlauf erkennen. Deshalb wurde die Untersuchung sowohl im Früh- wie auch im Spätsommer durchgeführt. Die Versuche fanden in zwei aufeinander folgenden Jahren zu ähnlichen Zeiträumen statt (Tab. 5.1). Jeder Versuch dauerte jeweils 5-6 Wochen.

Tab. 5.1: Versuchszeiträume der Untersuchung zum Pilzbefall von Lotus

Jahr	Zeitraum	Bezeichnung	Kürzel
2003	24.06.-29.07.	Frühsommer 03	S 1
2003	25.08.-06.10.	Spätsommer 03	S 2
2004	27.05.-08.07.	Frühsommer 04	S 3
2004	19.08.-30.09.	Spätsommer 04	S 4

Behandlungsvarianten

Es wurde mit vier verschiedenen Versuchsvarianten getestet:

1. Lotuspflanze überdacht und somit vor Regen geschützt
2. Lotuspflanze überdacht, täglich zusätzlich künstlich beregnet
3. Lotuspflanze frei exponiert und zusätzlich täglich künstlich beregnet
4. Lotuspflanze frei exponiert

Die Kunststoffkübel mit Lotuspflanzen wurden in den Botanischen Gärten Bonn im Abstand von jeweils ca. 50cm in Reihe aufgestellt. Die zwei mittleren Kübel wurden mit einem transparenten Dach überdeckt (Abb. 5.3), das als Regenschutz diente. Um eine Änderung des Mikroklimas (Erhöhung der Temperatur oder Luftfeuchtigkeit) zu verhindern, wurde das Dach in einer Höhe von 2 Metern montiert.

Oberhalb von zwei der vier Kübel wurden Sprinkleranlagen (Höhe 1,90 m) mit Brausen (Impuls-Brause, Typ 1906, Gardena Manufacturing GmbH, Ulm) montiert. Um eine gleichmäßige Beregnung zu gewährleisten, wurden beide Sprinkleranlagen von einem Wasserhahn aus betrieben. Die einzelnen Brausen wurden nach einer Teilung mit Schläuchen gleicher Länge verbunden. Mittels eines Bewässerungscomputers (Bewässerungsuhr, WT 1030 [1825], Gardena Manufacturing GmbH, Ulm) wurde die Beregnungszeit und -dauer eingestellt. Die beiden Lotuspflanzen wurden täglich um 7⁰⁰ Uhr und um 19⁰⁰ Uhr für 180 Sekunden beregnet. Zur Bestimmung der Niederschlagsmenge, die über die simulierte Beregnung niederging, wurde zu Beginn der Untersuchung dreimal das durchgelaufene Wasser einer Brause aufgefangen und der Niederschlag in Millimetern bestimmt.

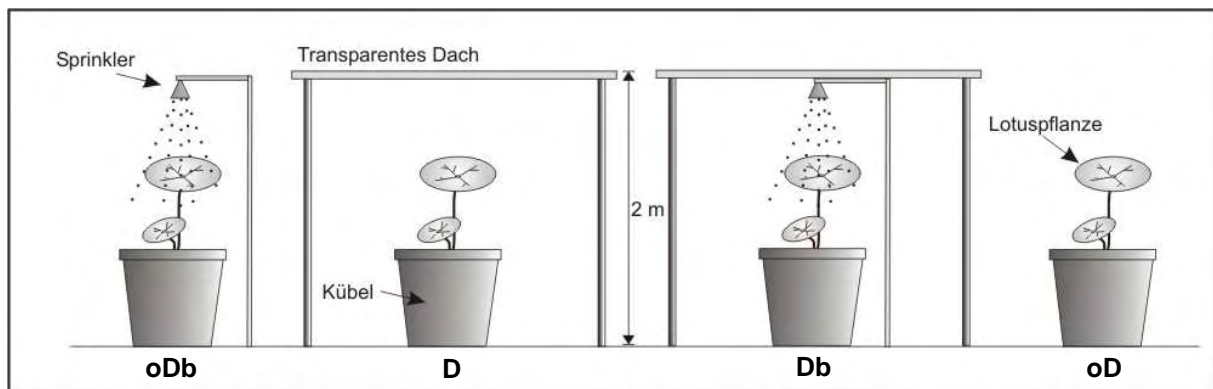


Abb. 5.3: Versuchsvarianten der Untersuchung zum Einfluss von Niederschlägen auf den Pilzbefall von *N. nucifera* (Kürzel siehe Tab. 5.2)

Tab. 5.2: Kennzeichnung der Lotus-Versuchsvarianten

Variante	Kennzeichnung
Lotuspflanze ohne Überdachung, nur natürlicher Niederschlag	oD
Lotuspflanze ohne Überdachung, natürlicher und künstlicher Niederschlag.	oDb
Lotuspflanze mit Überdachung, künstlicher Niederschlag.	Db
Lotuspflanze mit Überdachung, kein Niederschlag.	D

Zur Vereinfachung der Ergebnisdarstellung und der Diskussion wird im Folgenden jede Variante nur noch als Kürzel angegeben (vgl. Tab. 5.2).

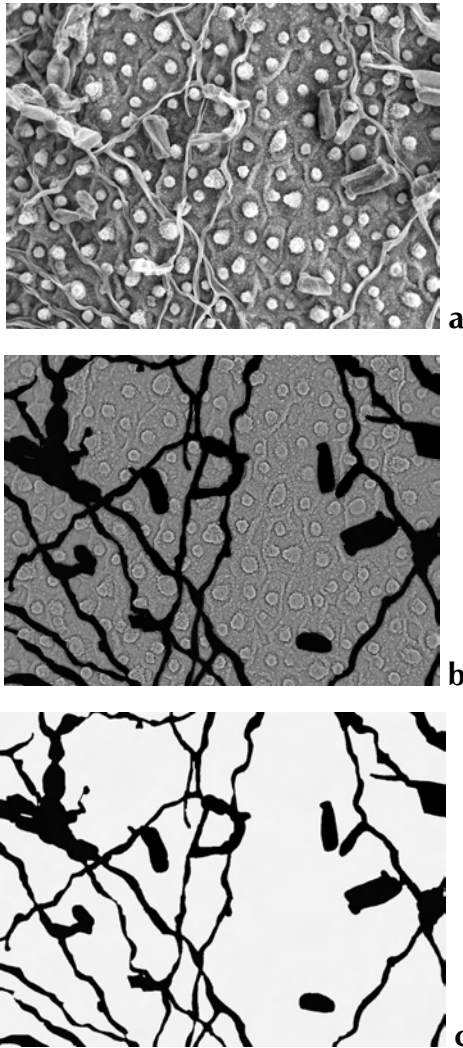
Probenentnahme

Alle sieben Tage wurde Material von den Blättern für die Befallsermittlung entnommen. Mit einem runden Stanzer (10 mm Ø) wurden aus den Blättern aller vier Varianten jeweils 10 Blattproben herausgeschnitten. Nur beim Versuchsdurchlauf S 3 wurden wegen der Größe der Blätter nur sieben Blattproben pro Entnahme herausgestanzt. Da bereits vor Versuchsbeginn Pilze auf den Oberflächen vorhanden sein konnten, wurde mit dem Versuchsbeginn eine erste Befallsermittlung durchgeführt. Diese diente als Grundbelegung in Woche 0.

Um die Blätter bei der Entnahme nicht zusätzlich zu verletzen, diente eine unter das Blatt gehaltene Korkplatte als Stanzunterlage. Die Blattproben wurden zufällig an verschiedenen Stellen des Blattes entnommen. Dabei wurde darauf geachtet, dass bei der Entnahme nicht die deutlich sichtbaren radiär verlaufenden Blattadern verletzt wurden, ansonsten wäre in den darauf folgenden Wochen mit Austrocknung und Absterben größerer Areale zu rechnen gewesen. Bis zur Präparation für die Befallsermittlung wurden die Blattproben in Exsikkatoren aufbewahrt.

Befallsermittlung

Jede entnommene, luftgetrocknete Probe wurde wie in Kap. 2.2 beschrieben für die Untersuchung im REM vorbereitet. Nach der Dokumentation der Proben im REM wurde in einem zweiten Schritt der Flächenanteil Pilz-/Blattoberfläche mittels Bildanalyse bestimmt. Von jeder Blattprobe wurden jeweils fünf zufällig ausgewählte Bereiche dokumentiert. Dabei wurde eine Vergrößerung von 300-fach bei einem Arbeitsabstand von 10 mm und einem Kippwinkel von 0° eingestellt. Mit dem REM-Softwaretool „Linewidth Measurement“ wurde eine Fläche von jeweils ca. 88.000 μm^2 im Bild markiert, in der später die Flächenbelegung des Pilzes analysiert wurde. Insgesamt wurde dabei pro ausgestanzte Blattprobe eine Fläche von ca. 440.000 μm^2 (oder 0,44 mm^2) dokumentiert.



Im ersten Schritt wurde die zuvor markierte, $88.000 \mu\text{m}^2$ große, Fläche aus dem REM-Bild ausgeschnitten.

Im zweiten Schritt wurden die Pilzanteile schwarz markiert und das übrige Bild kontrastärmer eingestellt.

Im dritten Schritt wurde die nicht belegte Lotus-Fläche in eine weiße Fläche umgewandelt und damit für die weitere Bearbeitung ein rein schwarz/weißes Bild erzeugt.

Abb. 5.4: Bearbeitungsschritte der Lotus-Bilder zur Ermittlung des Pilzbefalls

Bei der Auswertung der REM-Bilder am Computer wurden zunächst unter Zuhilfenahme des Programms Adobe Photoshop (Version 6.0.1, Adobe Systems Software Ireland Limited, Saggart D24, Irland) die markierte Fläche herausgeschnitten (Abb. 5.4a). Im zweiten Schritt wurden alle vorhandenen Pilzanteile schwarz markiert. Da eine automatische Konturerkennung mit Hilfe des Softwaretools „Zauberstab“ nur in wenigen Fällen gelang, wurde die Pilzkontur mit einem Zeichenstift auf einem digitalen Zeichentablett (Wacom Intous 2, Wacom Europe GmbH, Krefeld) nachgezeichnet. Anschließend konnte die Funktion „Zauberstab“ zuverlässig ausgeführt werden und das Innere des Pilzes schwarz angefüllt werden (Abb. 5.4b). Zusätzlich wurden die Kontraste so eingestellt, dass die Oberfläche von Lotus kontrastärmer ausfiel (Abb. 5.4b). Mit dem Programm Scion Image (Scion Corporation, Beta Version 4.0.2) wurde anschließend mit der Funktion „Threshold“ das Bild in ein reines Schwarzweißbild umgewandelt (Abb. 5.4c). Der Schwellenwert, um die kontrastärmeren Bildbereiche

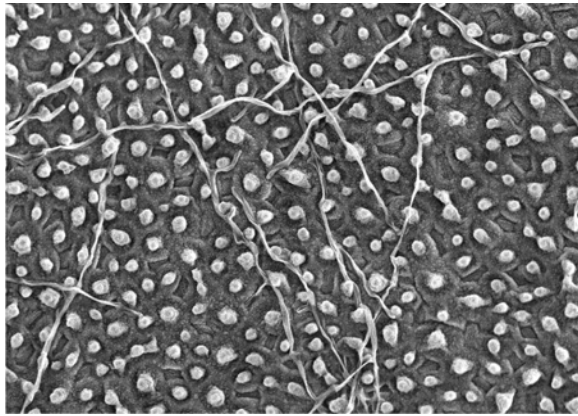
auszulöschen und damit in reines Weiß umzuwandeln, wurde manuell eingestellt. Wären zuvor bei der Lotus-Oberfläche die Kontraste nicht geändert worden, wären auch größere Anteile der schwarz markierten Pilzbereiche von der Auslöschung betroffen gewesen. Auf diese Weise erhielt man nach der Anwendung der Funktion „Measure“ eine Angabe über die Anzahl der schwarzen Pixel im Bild. Basierend auf der Bildauflösung konnte so der prozentuale Flächenanteil von Schwarz (Pilzhypen) ermittelt werden.

Bei Versuchsdurchlauf S 4 erfolgte die Befallsermittlung nicht nach diesem Schema, da im Verlauf des Versuches der Pilzzuwachs extrem stark war und ein Nachzeichnen der Hyphen sich als unmöglich erwies. Deshalb wurden in diesem Versuch die Flächenanteile mittels einer siebenstufigen Skala geschätzt (Tab. 5.3).

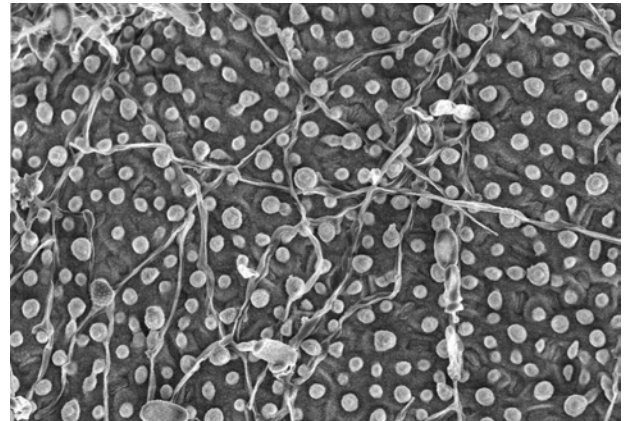
Tab. 5.3: Klasseneinteilung der Flächenbelegung mit Pilz bei *N. nucifera*.

Klasse 1	0-10% Flächenbelegung
Klasse 2	11-20% Flächenbelegung
Klasse 3	21-30% Flächenbelegung
Klasse 4	31-40% Flächenbelegung
Klasse 5	41-50% Flächenbelegung
Klasse 6	51-60 % Flächenbelegung
Klasse 7	61-70 % Flächenbelegung

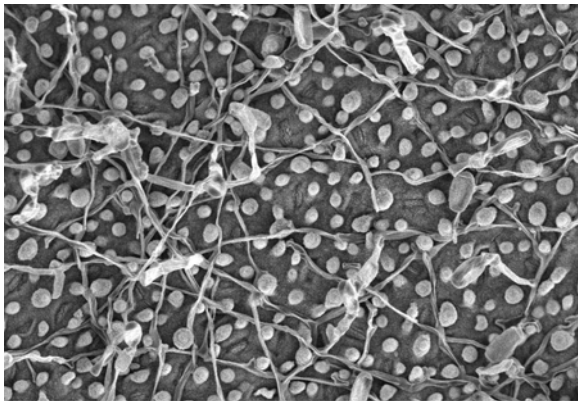
Die Einteilung in sieben Klassen mit Flächenbelegungen bis 70% war ausreichend, da stärkere Belegungen nicht vorkamen. Zur Orientierung und zur besseren Beurteilung der Flächenbelegung wurden von unterschiedlich stark befallenen Flächen nach der oben beschriebenen Methode die Flächenanteile genau ermittelt. Diese Bilder dienten als Entscheidungshilfe bei der Zuordnung der Belegungsklassen (s. Abb. 5.5) und vereinfachten die Belegungsschätzung. In schwierigen Fällen, bei denen eine Entscheidung zwischen zwei Klassen nicht eindeutig war, wurde die Klassenzugehörigkeit erneut nach der Flächenbestimmungsmethode wie oben beschrieben ermittelt.



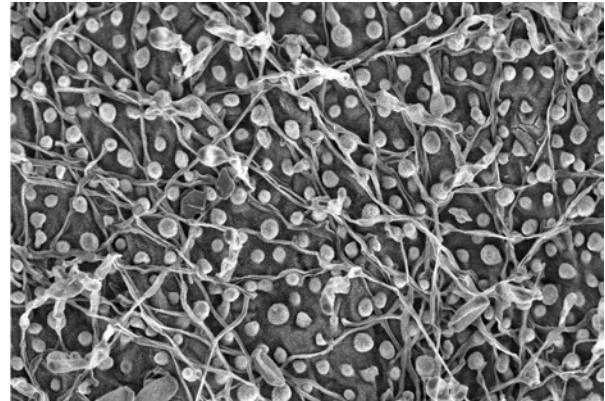
10% Pilzbelegung



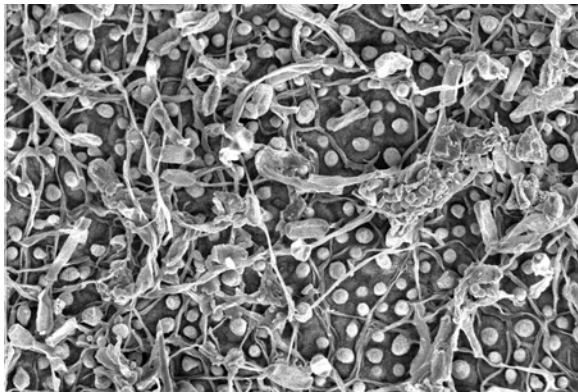
20% Pilzbelegung



30% Pilzbelegung



40% Pilzbelegung



50% Pilzbelegung

Abb. 5.5: Beispielhafte Pilzbelegungsichten von *N. nucifera* mit *Oidium spec.*

Pilzbestimmung

Infizierte Lotusblätter wurden zur Pilzbestimmung nach Halle an das Institut für Geobotanik der Martin-Luther-Universität geschickt. Die Bestimmung des Pilzes erfolgte durch Prof. Dr. Uwe Braun nach rein morphologischen Merkmalen. Die befallenen Lotusblätter wurden sowohl als Trockenmaterial für das Herbarium, wie auch als Frischmaterial versendet.

Auswertung

Pro Blatt und Woche erhielt man gemäß der Befallsermittlung (s. Absch. Befallsermittlung) 50 Messwerte (Ausnahme: S 3 mit 35 Messwerten), aus denen die Flächenbelegung (arithmetisches Mittel und SD) berechnet wurde. Auch für die Werte der halbquantitativen Erfassung (Versuch S4) wurden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung berechnet.

Da die Daten der Belegung nicht normalverteilt waren, Normalverteilung auch durch gängige Datentransformationen nicht erreicht werden konnte und die Varianzen zudem stets heterogen waren, wurden ausschließlich nichtparametrische statistische Tests angewendet (s. Kap. 2.2).

Erfassung der Umgebungsparameter

Als Umgebungsparameter wurden bei dem Versuchsdurchlauf im Früh- und Spätsommer 2004 Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in Messintervallen von 15 Minuten mittels Data-Loggern (Gemini Data Loggers, Typ Tinytag plus TGP-1500, Chichester/UK) erfasst. Diese wurden in einer Höhe von einem Meter über dem Boden (ca. Höhe der untersuchten Blätter) an Holzstäben montiert. Ein Datalogger befand sich in unmittelbarer Nähe der Variante oD, der zweite bei der Variante Db. Somit wurden die Umgebungsbedingungen sowohl unter als auch neben dem Dach ermittelt.

Die Daten der 12-wöchigen Messungen wurden mit dem Programm Microsoft EXCEL ausgewertet. Um die Datenmenge zu reduzieren, wurden pro Versuch jeweils nur die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit im Tagesdurchschnitt als Mittelwert aus 96 Messwerten angegeben.

Zusätzlich wurden am 10. 09. 2004 um 9:00 Uhr und um 14:30 Uhr die Lichtintensität und die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) gemessen. Die Daten der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Lichtintensität und der PAR dienen hauptsächlich für die Beurteilung, in wie weit das Dach das Mikroklima beeinflusste.

Niederschlagsdaten

Die Daten über die täglichen Niederschläge in der Region Bonn wurden vom Meteorologischen Institut der Universität Bonn zur Verfügung gestellt. Die Datentabellen umfassten die stündlich aufgenommenen Regenmengen. Diese wurden summiert und als Niederschlag pro Woche in Millimetern angegeben. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Niederschläge von Entnahmetag zur nächsten Entnahme

zusammengerechnet wurden. Die Niederschläge am Tag der Entnahme wurden durch zwei geteilt und hälftig jeweils der aktuellen und nachfolgenden Woche zugerechnet. Zum Niederschlag der Variante Db wurde zusätzlich die Regenmenge des künstlichen Niederschlags aufsummiert.

5.4 Ergebnisse

Der Pilz von *N. nucifera*

Aufgrund des Erscheinungsbildes wurde der Pilz, der auf Lotus gefunden wurde, als *Oidium spec.* (Pseudoidium) bestimmt.

Die infizierten Blätter wiesen stets ein dünnes, diffuses, weißliches Mycelium auf. Dieses war anfangs lokal begrenzt als ein kreisrunder Spot zu erkennen. Erst im Laufe der weiteren Entwicklung wuchsen die einzelnen Mycelien diffus ineinander (s. Abb. 5.6).

Im REM-Bild (s. Abb. 5.7) erkennt man von oberflächennahen Hyphen abstehende Konidiophoren, die zwischen 40-80 μm lang sind. Die Konidien sind solitär, wobei die primären Konidien eierförmig-ellipsoid sind, eine abgerundete Spitze und eine mehr oder weniger stumpfe Basis besitzen. Die sekundären Konidien sind subzylindrisch-doliiform mit stumpfen Enden. Die Größe der Konidien beträgt 20-38(-40) x 10-18 μm . Obwohl die Lotuspflanzen dem natürlichen Befall im Freiland ausgesetzt waren, blieb das morphologische Erscheinungsbild des Pilzes stets gleich. Während der mehrfachen Wiederholung der Experimente zu verschiedenen Jahreszeiten in den Jahren 2003 und 2004 konnte rein morphologisch kein Unterschied ausgemacht werden. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass es sich jeweils um die gleiche Pilzart handelt, die *N. nucifera* in den Botanischen Gärten Bonn befällt.



Abb. 5.6: Makroskopisches Erscheinungsbild des Pilzmycels auf Lotus

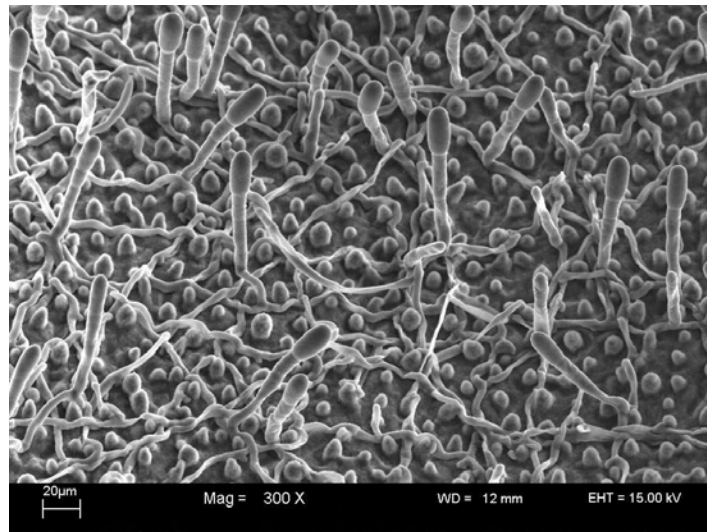


Abb. 5.7: REM-Aufnahme des Pilzes *Oidium spec.* auf Lotus.

Umgebungsbedingungen

Strahlung

Während bei den Messungen in den Morgenstunden der Himmel noch wolkenlos war, erfolgte die zweite Messreihe bei bewölktem Himmel. Dadurch ergaben sich am frühen Nachmittag insgesamt geringere Werte als bei der morgendlichen Messung (Tab. 5.4).

Sowohl bei der Messung der PAR, wie auch bei der Lux-Messung konnten generell keine starken Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Lediglich bei der 9:00 Uhr Messung der Variante oDb lagen die Werte der PAR und der Lichtintensität unterhalb der übrigen Werte. Der niedrige PAR-Wert der Variante oDb ist darauf zurückzuführen, dass das Blatt noch im Halbschatten eines angrenzenden Glasgewächshauses lag. Diese Abweichung konnte in der Nachmittagsmessung nicht mehr beobachtet werden. Ein Unterschied zwischen den überdachten und den Lotuspflanzen ohne Dach wurde nicht festgestellt.

Tab. 5.4: Strahlungsbedingungen an den Lotus-Versuchsvarianten zu zwei verschiedenen Uhrzeiten gemessen am 10.09.2004

	PAR [μmol]		Lichtintensität [lux]	
	9:00 Uhr	14:30 Uhr	9:00 Uhr	14:30 Uhr
oDb	200	230	27000	18800
D	430	210	30000	17700
Db	430	260	30000	18000
oD	425	210	30000	18700

Rel. Luftfeuchtigkeit während des Versuchs S 3

Im Tagesmittel lag die rel. Luftfeuchtigkeit im gesamten Versuchsverlauf bei den Varianten oD und Db zwischen 60 und 70% (Abb. 5.8). Die Unterschiede zwischen den beiden Standorten waren meist gering. Besonders in den Nachtstunden lagen einige Einzelwerte deutlich höher. Da teilweise über mehrere Stunden hinweg der gleiche Wert angezeigt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Fall eine Kondensation am Sensor zur Tropfenbildung führte und damit Fehlmessungen verursacht wurden.

Trotz der zusätzlichen Beregnung bei der Variante oDb wurde keine erhöhte rel. Luftfeuchtigkeit festgestellt.

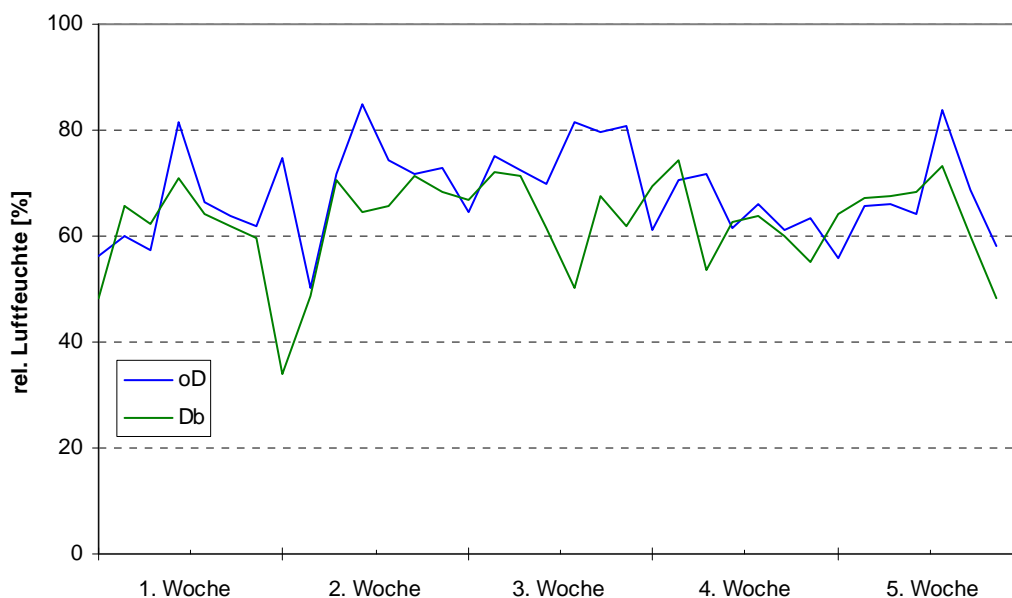


Abb. 5.8: Verlauf der rel. Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von 5 Wochen im Frühsommer 2004. Dargestellt ist die rel. Luftfeuchtigkeit im Tagesdurchschnitt auf der Basis von 96 Messwerten

Rel. Luftfeuchtigkeit während des Versuchs S 4

Die Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit im Spätsommer wiesen Unregelmäßigkeiten auf (Abb. 5.9). Die rel. Luftfeuchtigkeit bei der Variante Db schwankte mit Werten zwischen 3% und 98,8% ungewöhnlich stark. Der Verlauf der rel. Luftfeuchtigkeit gemessen an der Variante oD wies wesentlich geringere Schwankungen auf. Die meisten Werte bewegten sich im Bereich zwischen 50% und 80%.

In beiden Datensätzen wurde ungewöhnlich häufig der Wert von 98,8% aufgezeichnet, der sehr wahrscheinlich auf Kondensation am Sensor zurückzuführen ist. Während bei der Variante oD meist nach kurzer Zeit wieder korrekte Daten gemessen wurden, dauerten die Fehlmessungen am Sensor der Variante Db meist viele Stunden, manchmal einige Tage. Es muss davon ausgegangen werden, dass bei diesem Sensor eine Fehlfunktion die Datensätze unbrauchbar gemacht hat. Die Daten werden deshalb in der anschließenden Betrachtung außen vor gelassen.

Die rel. Luftfeuchtigkeit in der Nähe der Variante oD betrug im Mittel während der gesamten Versuchsdauer 66%, die Werte schwankten aber zum Teil sehr stark. In den Nächten gegen Ende der Versuchsdauer wurden höhere Luftfeuchten gemessen.

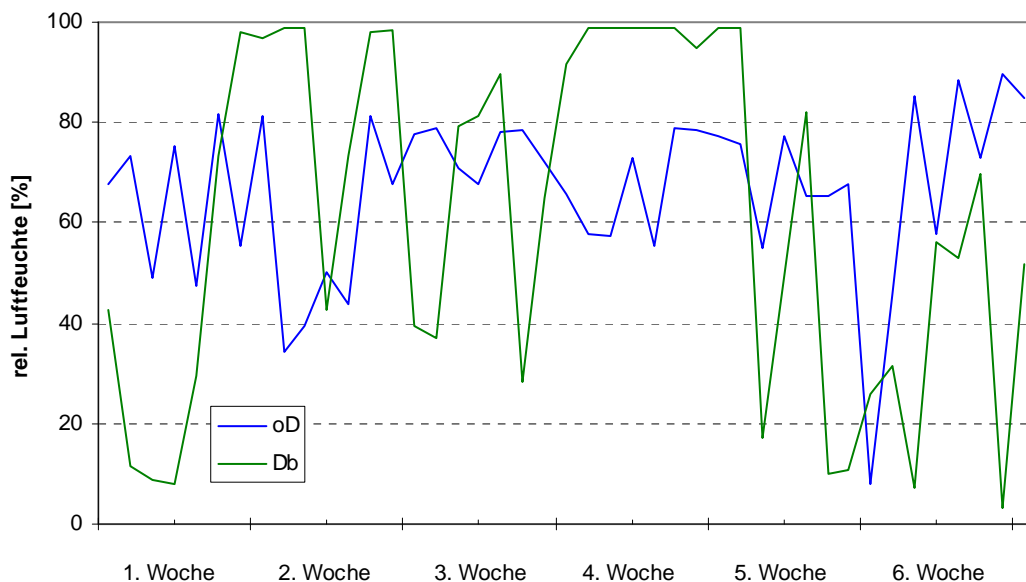


Abb. 5.9: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von 6 Wochen im Spätsommer 2004. Dargestellt ist die rel. Luftfeuchtigkeit im Tagesdurchschnitt auf der Basis von 96 Messwerten

Temperatur während des Versuchs S 3

Die Unterschiede der Temperaturen zwischen den beiden Varianten oD und Db waren gering. Die Tagesdurchschnittswerte unterschieden sich im gesamten Versuchsdurchlauf kaum oder nur wenig voneinander (Abb. 5.10). Im Mittel betrug die Temperaturen im Versuchszeitraum 18-19°C. Deutlich ist der gleichmäßig parallele Verlauf der Temperaturkurve zu erkennen. Größere Unterschiede blieben mit Ausnahme der letzten Messungen vollständig aus.

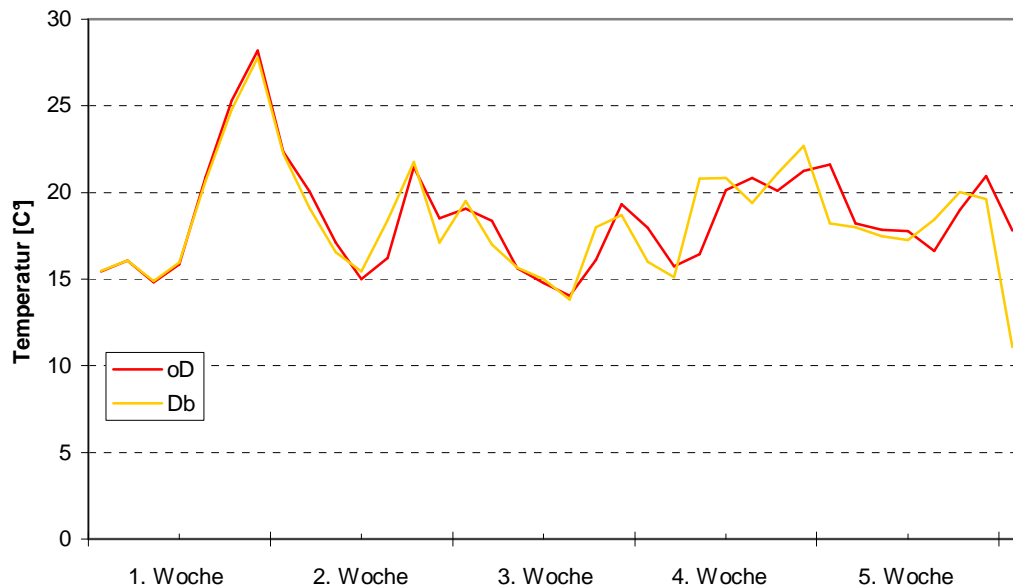


Abb. 5.10: Verlauf der Temperatur über einen Zeitraum von 5 Wochen im Frühsommer 2004. Dargestellt ist die Temperatur im Tagesdurchschnitt auf der Basis von 96 Messwerten

Temperatur während des Versuchs S 4

Wie bei der Luftfeuchte (s. Abb. 5.9), ergab auch die Messung der Temperatur an der Variante Db fehlerhafte Werte (Abb. 5.11). Während die Temperatur über den gesamten Versuchsdurchlauf an der Variante oD im Mittel $16,8^{\circ}\text{C}$ betrug, lag die gemittelte Temperatur an der Variante Db bei nur $3,1^{\circ}\text{C}$. Über mehrere Tage hinweg zeigte der Sensor sogar Werte unter 0°C an. Die Daten des defekten Sensors werden deshalb im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Die Temperatur an der Variante oD schwankte in den ersten Wochen im Tagesmittel zwischen 20°C und 15°C . Ab der vierten Woche begannen die Temperaturen zu sinken und bewegten sich hauptsächlich im Bereich zwischen 15°C und 12°C .

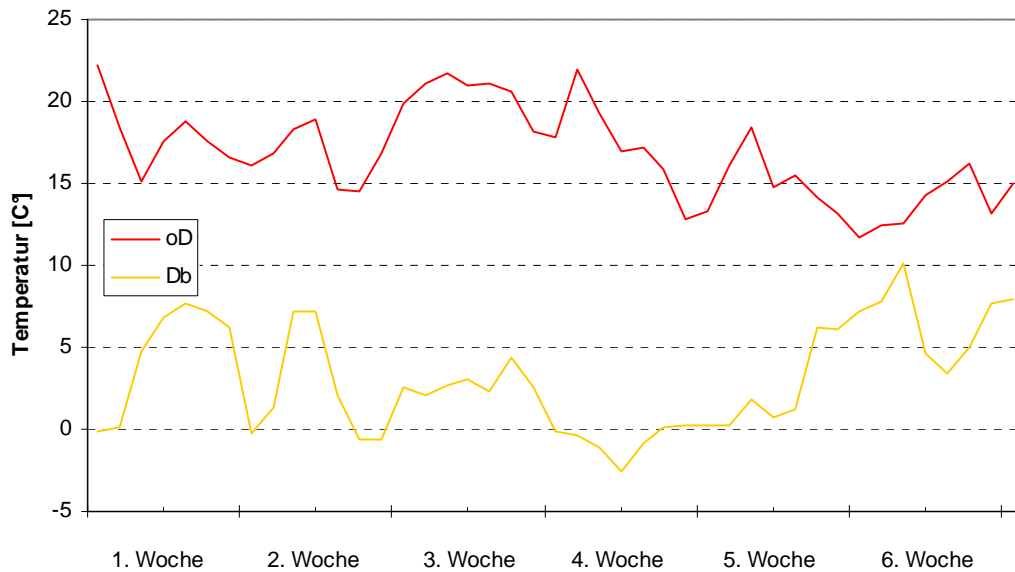


Abb. 5.11: Verlauf der Temperatur über einen Zeitraum von 6 Wochen im Spätsommer 2004. Dargestellt ist die Temperatur im Tagesdurchschnitt auf der Basis von 96 Messwerten

Niederschläge

In den Versuchszeiträumen von S 1 und S 3 (Frühsommer) fiel im Vergleich zu den Versuchen im Spätsommer (S 2 und S 4) verhältnismäßig wenig Regen. Besonders auffällig sind Wochen mit geringem Niederschlag. Diese sind in der Tab. 5.5 rot markiert, da sie für die spätere Diskussion von besonderer Bedeutung sind.

Tab. 5.5: Wöchentliche Niederschläge in Millimetern. Rot markiert sind Wochen mit wenig oder keinem Niederschlag. (Daten: Meteorologisches Institut, Bonn)

Versuch	1. Woche	2. Woche	3. Woche	4. Woche	5. Woche	6. Woche	Summe
S 1	9,7	13,0	0	6,5	14,6	-	43,8
S 2	19,9	16,6	17,9	0,4	12,8	51,2	118,8
S 3	8,1	10,7	13,9	15,3	2,7	11,9	62,6
S 4	24,7	19,7	0,2	8,9	45,3	21,3	120,1

Während die Variante D keinem und die Variante oD den in der Tab. 5.5 aufgelisteten Niederschlagsmengen ausgesetzt war, wurden die Varianten Db und oDb zusätzlich täglich beregnet, wodurch die wöchentlichen Niederschlagsmengen entsprechend höher lagen. Die wöchentliche Niederschlagsmenge bedingt durch die Sprinkleranlage entsprach 1732,6 mm. Bei der Variante oDb summierte sich bei allen

Versuchsdurchläufen diese Regenmenge zusätzlich zu den natürlichen Niederschlägen aus der Tab. 5.5.

Pilzbefall von *N. nucifera*

Versuchsdurchlauf S 1 (Abb. 5.12)

Bei diesem Versuch (Juni-Juli 2003) konnten deutliche Unterschiede im Pilzbefall nach 5 Wochen Untersuchungsdauer ausgemacht werden. In den ersten Wochen wurden kaum Unterschiede im Pilzbefall zwischen den untersuchten Blättern nachgewiesen. Lediglich die überdachte Variante ohne Beregnung (D) wies bereits in den ersten Wochen eine deutliche Zunahme auf. Diese Flächenbelegung unterschied sich von den übrigen Blättern ab der Woche 3 signifikant. In der fünften Woche bedeckte das Pilzmycel bei dem Lotusblatt unter dem Dach bereits eine Fläche von fast 20%. Bei den übrigen Lotusblättern konnte auch nach fünf Wochen nur eine sehr geringe Flächenbedeckung festgestellt werden. Zwischen diesen Varianten gab es keine signifikanten Unterschiede.

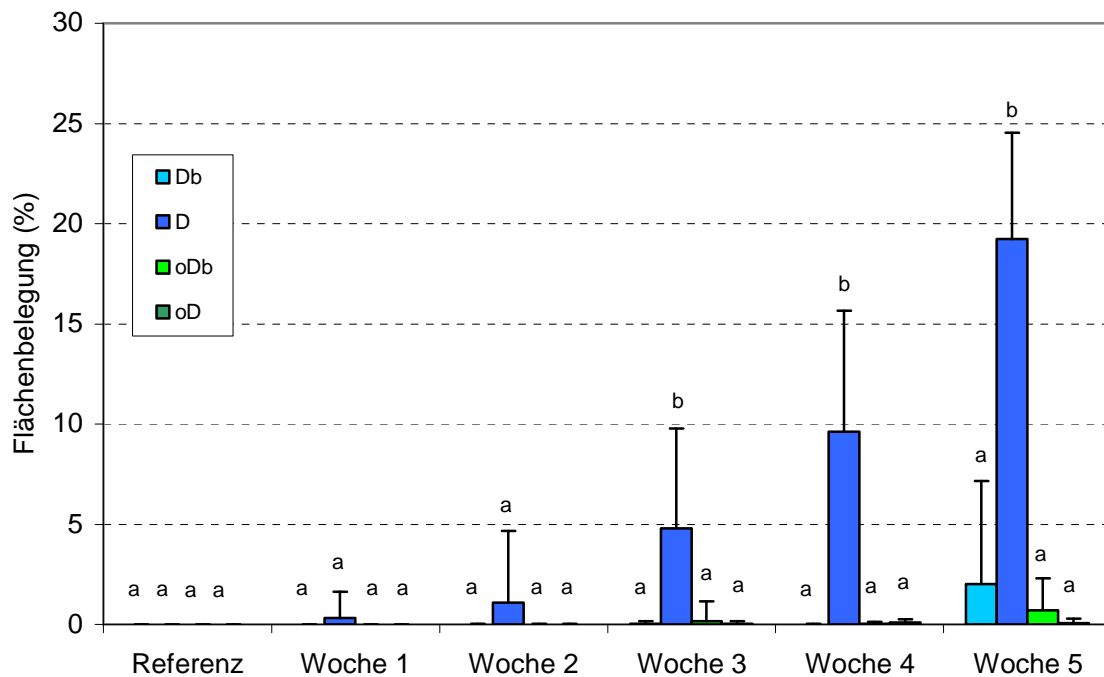


Abb. 5.12: Verlauf des Befalls von *N. nucifera* mit *Oidium spec.* bei vier verschiedenen Behandlungsvarianten. Dargestellt sind die prozentualen Flächenbelegungen mit Pilz im Vergleich über fünf Wochen im Frühsommer 2003

Der Versuch wurde bereits nach 5 Wochen abgebrochen, da die Blätter verhältnismäßig klein waren und für eine weitere Woche deshalb nicht mehr genügend Material für die Entnahme zur Verfügung stand.

Versuchsdurchlauf S 2 (Abb. 5.13)

Im Spätsommer 2003 fiel eine Pilzbelegung insgesamt deutlich stärker aus. Während zu Beginn auf den Blättern aller Varianten kaum Bewuchs beobachtet wurde und nur geringe Zuwächse in den darauf folgenden drei Wochen festgestellt wurden, änderte sich dieses Bild ab der vierten Woche. Bis zur letzten Woche war der Pilzbefall besonders stark bei dem Lotusblatt angestiegen, welches nur dem natürlichen Niederschlag (oD) ausgesetzt war. Ebenfalls stark zugenommen hatte der Pilzbefall auf dem Blatt, welches keinem Niederschlag ausgesetzt war (D). Bei allen untersuchten Blättern schwankte die Flächenbelegung stark. Signifikant die geringste Pilzbelegung wurde zum Ende des Versuchs auf der Variante Db festgestellt. Während die Varianten oDb und D sich nicht voneinander unterschieden, war die Pilzbelegung bei der Variante oD signifikant höher.

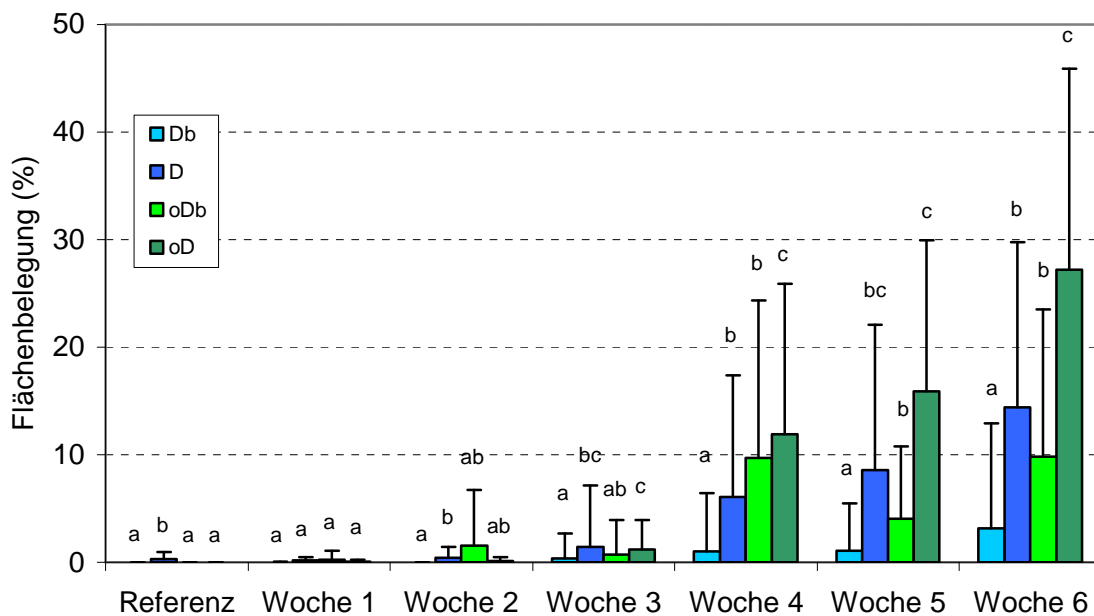


Abb. 5.13: Verlauf des Befalls von *N. nucifera* mit *Oidium spec.* bei vier verschiedenen Behandlungsvarianten. Dargestellt sind die prozentualen Flächenbelegungen mit Pilz im Vergleich über sechs Wochen im Spätsommer 2003

Versuchsdurchlauf S 3 (Abb. 5.14)

Im Frühsommer 2004 lag nach sechs Wochen Untersuchungsdauer ein ähnliches Bild des Befalls von *N. nucifera* mit *Oidium spec.* vor, wie bereits bei der Untersuchung im Frühsommer 2003. Erneut fand ein Pilzwachstum fast ausschließlich auf dem überdachten und unberegneten Blatt statt (D). Auf den übrigen Blättern lag die Belegung unterhalb von 1%. Auch in diesem Fall war nur der Unterschied in der Flächenbelegung zwischen der Variante D und den übrigen Varianten signifikant.

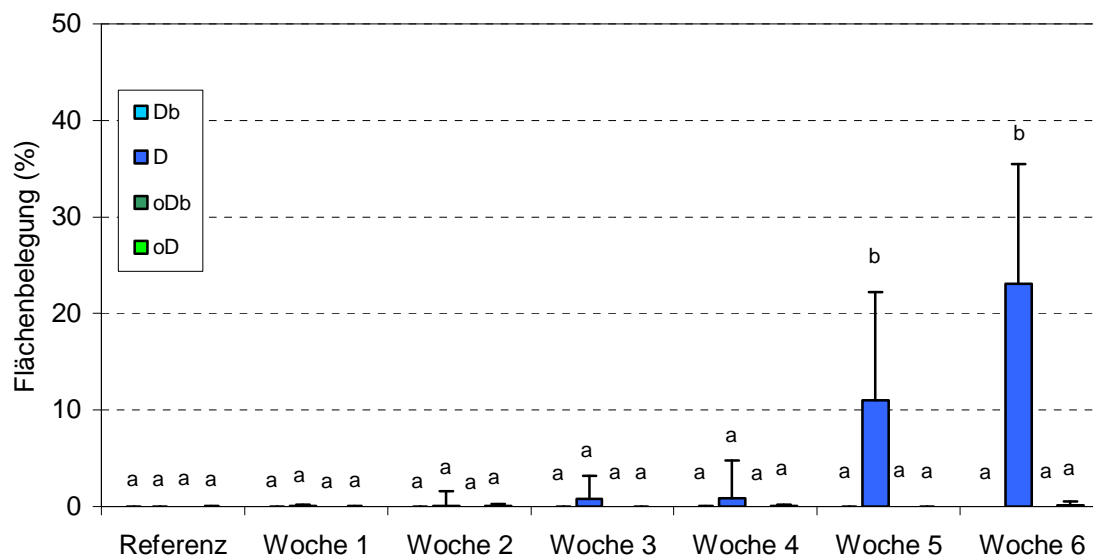


Abb. 5.14: Verlauf des Befalls von *N. nucifera* mit *Oidium spec.* bei vier verschiedenen Behandlungsvarianten. Dargestellt sind die prozentualen Flächenbelegungen mit Pilz im Vergleich über sechs Wochen im Frühsommer 2004

Versuchsdurchlauf S 4 (Abb. 5.15)

Im Spätsommer 2004 war bereits, ähnlich wie in 2003, deutlich mehr Pilzbewuchs auf den Blättern zu beobachten. Die Klasseneinteilung ermöglichte keine feineren Abstufungen, so dass in den ersten drei Wochen scheinbar keine Änderungen auftraten. Bei allen Blättern betrug die Pilzbelegung 0-10%. Erst in der dritten Woche stieg der Befall in den Varianten D und oD an. Bis zur sechsten Woche stieg der Befall besonders dieser beiden Varianten weiter an. Die Varianten Db und oDb wiesen erst nach sechs Wochen einen leicht stärkeren Befall auf (Klasse 2). Gegen Ende der Untersuchung war die Flächenbelegung der beiden Varianten D und oD signifikant höher als die der beiden Varianten Db und oDb.

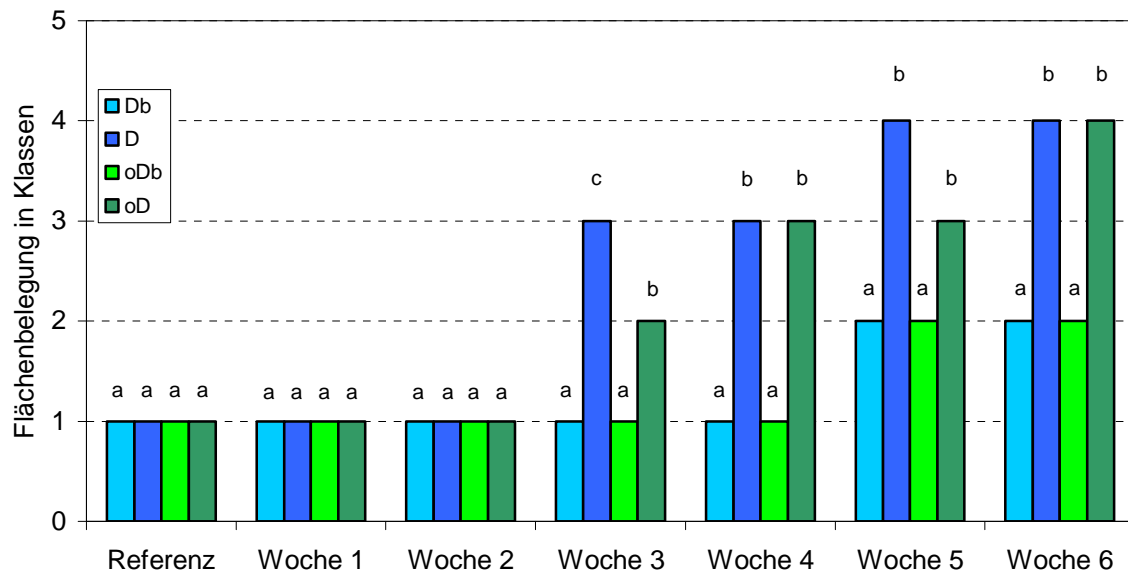


Abb. 5.15: Verlauf des Befalls von *N. nucifera* mit *Oidium spec.* bei vier verschiedenen Behandlungsvarianten. Dargestellt sind die Flächenbelegungen mit Pilz eingeteilt in Klassen im Vergleich über sechs Wochen im Spätsommer 2004

5.5 Diskussion

Der Pilz

Der Befall von *Nelumbo nucifera* mit einem Mehltaupilz in den Botanischen Gärten Bonn ist ungewöhnlich. Für Lotus sind bislang nur zwei Mehltauarten beschrieben worden, die einen Befall verursachen (Nguyen, 2001; Nomura, 1997). Keiner dieser Pilze stimmte jedoch mit den morphologischen Merkmalen des hier gefundenen Pilzes überein. Eine genauere Spezifizierung anhand von molekularbiologischen Daten wird notwendig sein, um seinen Ursprung zu diskutieren.

Umgebungsbedingungen in Abhängigkeit einer Überdachung der Lotuspflanzen

Die Erfassung der Umgebungsparameter Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Strahlung belegte, dass kein großer Unterschied zwischen den mikroklimatischen Bedingungen, unter denen die Pflanzen wuchsen, bestand. Die Temperaturen und die rel. Luftfeuchtigkeit zeigten sehr ähnliche Verläufe, obwohl eine Überdachung zu einer Erhöhung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit hätte führen können. Auch die Strahlung war mit und ohne Dach kaum unterschiedlich. Lediglich Schatten, hervorgerufen durch in der Nähe befindliche Gebäude oder Bäume wirkten sich aus. Dieser Effekt war jedoch auf wenige Stunden am Morgen beschränkt.

Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass durch die Teilbedachung keine deutliche Veränderung des Mikroklimas stattgefunden hat und Unterschiede im Pilzbefall auf den Pflanzen ausschließlich auf anderen Faktoren zurückgeführt werden können.

Der Befall von *N. nucifera* in Abhängigkeit von Niederschlägen

Lotus besitzt hervorragende selbstreinigende und unbenetzbare Eigenschaften (Barthlott & Neinhuis, 1997) und wird deshalb gerne als Modellpflanze bei Versuchen eingesetzt (Bhushan & Jung, 2006; Patankar, 2004b). Der Befall einer solchen Pflanze mit Pilzen ist daher von besonderem Interesse. Wie bereits von Fountain (2000) unter dem Titel „Evading the Lotus Effect“ angedeutet, finden Mikroorganismen offenbar Möglichkeiten, sich auch auf selbstreinigenden, superhydrophoben Oberflächen zu etablieren. Jedoch werden in dieser Publikation die falschen Schlüsse in Bezug auf die Bedeutung der Struktur der Oberflächen gezogen. So wird Weizen als ein Beispiel für eine glatte, nicht selbstreinigende Oberfläche angeführt, was wie im Kap. 4 gezeigt, nicht zutrifft.

Bei Lotus sind die Symptome des Pilzbefalls stets die gleichen. Blätter, die von anderen Blättern überdeckt werden, werden zuerst befallen. Ein deutlich erkennbares, rundes, weiß-graues Mycel wird sichtbar. Wie diese Untersuchung klar gezeigt hat, besteht dabei ein Zusammenhang zwischen Befall und Niederschlägen. Während die Umgebungsparameter wie photosynthetisch aktive Strahlung, Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit für alle Varianten nahezu gleich waren, unterschieden sich die Varianten nur in Bezug auf die Niederschläge. Die Pflanze, welche über den gesamten Untersuchungszeitraum gänzlich ohne Niederschlag blieb, zeigte in allen vier Versuchsdurchläufen starken Befall mit *Oidium* spec. Dieses Ergebnis war generell unabhängig vom Jahr und vom Zeitraum, in dem untersucht wurde. Die Bedeutung der Niederschläge spiegelte sich besonders in den beiden Untersuchungen des Frühsommers wider. Hier wurde ein signifikant höherer Befall nur auf den Blättern gefunden, die nie Niederschlägen ausgesetzt waren (Variante D). Besonders eindrucksvoll war der Unterschied des Pilzbefalls zwischen den beregneten (z.B. oDb, Abb. 5.16a) und den unberegneten Pflanzen (z.B. D, Abb. 5.16b). Rein visuell konnten bereits nach wenigen Wochen deutliche Befallsunterschiede ausgemacht werden.



a: Variante oDb nach 3 Wochen (07.09.04)

b: Variante D nach 3 Wochen (07.09.04)

Abb. 5.16: Photographische Dokumentation des Pilzbefalls von *N. nucifera* im Spätsommer 2004 (S 4)

Im Spätsommer, sowohl im Jahr 2003 wie auch im Jahr 2004, fiel der Befall mit *Oidium* spec. jedoch nicht nur bei der überdachten Lotuspflanze (Variante D) stark aus. Auch die Pflanze, die nicht überdacht war (Variante oD), wies einen starken Befall auf. Dieses Phänomen kann mit den wöchentlichen natürlichen Niederschlagsmengen erklärt werden. In beiden Spätsommeruntersuchungen war jeweils in der Woche, in der der erste Anstieg des Befalls auf der Variante oD beobachtet wurde, besonders wenig Niederschlag gefallen (vgl. Tab. 5.5). Dies verursachte wahrscheinlich zwei Effekte. Zu

einem fand keine Abreinigung der Konidien von der Oberfläche statt, zum anderen sind Mehltaupilze dafür bekannt, sich besonders unter trockenen Bedingungen zu verbreiten (Hirst & Stedman, 1963; Ingold, 1978). Wahrscheinlich wurden besonders viele *Oidium*-Konidien unter diesen trockenen Bedingungen auf den Lotusblättern abgelegt. Da diese nicht mit Niederschlägen abgereinigt wurden, konnten sie die Pflanze infizieren. Ein ähnliches Untersuchungsergebnis beschreiben Merchán & Kranz (1985) für Weizen. Bei überdachten Weizenpflanzen wurde ein stärkerer Befall mit *B. graminis* festgestellt. Dagegen wirkte sich eine zusätzliche Beregnung der Weizenpflanzen im Gegensatz zu der hier vorgestellten Untersuchung nicht aus.

Die Zunahme der befallenen Oberfläche in Folge einer erfolgreichen Infektion ist nicht mehr weiter von Niederschlägen abhängig. Diese Entwicklung ist hauptsächlich auf das Flächenwachstum des Oberflächen-Myceles zurückzuführen.

Die Pflanzen (oDb, Db), welche dem simulierten Niederschlag ausgesetzt waren, wiesen nach Abschluss der Untersuchungen in allen Fällen einen geringeren Befall mit *Oidium spec.* auf als die beiden anderen Varianten. Dies bestätigt die Vermutung, dass selbstreinigende Eigenschaften eine Reduktion des Infektionsrisikos mit Pilzen bewirken. Dies konnte bereits für *Brassica oleracea* (Neinhuis *et al.*, 1992) oder für *Triticum aestivum* (vgl. Kap. 4) gezeigt werden konnte. Umgekehrt weisen gut benetzbare Blätter verstärkt Infektionen auf. Auf diesen generellen Zusammenhang zwischen Benetzung und Befall mit verschiedenen Pflanzenpathogenen wiesen bereits Allen *et al.* (1991) und Bradley *et al.* (2003) hin. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass auch der simulierte Regen selbst zur Reduktion des Befalls geführt hat (Sivapalan, 1993). Aus der Literatur ist ebenfalls bekannt, dass die Verbreitung der Konidien von Mehltaupilzen durch Regen beeinträchtigt werden kann (Ingold, 1978). Zudem besteht die Möglichkeit, dass das Pilzmycel durch auftreffende Tropfen geschädigt wurde. Eine solche Schädigung des Myceles bei starkem Regen wurde beispielsweise für *Blumeria graminis* beschrieben (Merchán, 1984).

Oidium spec. scheint eine ähnliche Strategie wie *B. graminis* zu besitzen (vgl. Kap. 4). Bei trockenen Umgebungsbedingungen verbreitet sich der Pilz über Konidien (Hirst, 1953; Yarwood, 1978) und vermag sich schnell auf der Wirtsoberfläche zu etablieren. Auch bei *Oidium spec.* wird wahrscheinlich ein eigener Wasservorrat ähnlich wie bei *B. graminis* in den Konidien mitgeführt (Yarwood, 1957), der eine Keimung auf den trockenen Lotus-Oberflächen ermöglicht.

Eine ähnliche Untersuchung an Klee (*Trifolium repens*) zeigte, dass bei Überdachung von Pflanzen ein stärkerer Mehltau-Befall auftrat, als bei nicht überdachten (Yarwood, 1957). Auch der Klee gehört, wie viele Fabaceen, zu den unbenetzbaren (Holloway, 1970) und damit wahrscheinlich auch zu den selbstreinigenden Pflanzen.

Vom Weihnachtsstern (*Euphorbia pulcherrima*) ist ebenfalls ein *Oidium*-Pilz bekannt und auch in diesem Fall handelt es sich um eine unbenetzbare Oberfläche (Brewer et al., 1991), die von diesem Mehltau verursachenden Pilz besiedelt wird (Celio & Hausbeck, 1997). Der Vergleich zu dem *Oidium*-Pilz von Lotus liegt deshalb nahe. Auch dieser Pilz wird vornehmlich bei trockenen Bedingungen verbreitet (Byrne et al., 2000). Wie bereits für viele Mehltaupilze beschrieben, bildet auch dieser innerhalb weniger Stunden einen primären Keimschlauch (Celio & Hausbeck, 1997), mit dem er sich an einer Oberfläche festheftet. Ähnlich könnte auch die Etablierung von *Oidium* spec. auf *N. nucifera* ablaufen. Ab einem bestimmten Keimstadium reicht die Kapillarkraft der Regentropfen nicht mehr aus, um die Konidien abzuwaschen. Das Voranschreiten der Infektion kann dann nur noch mit anderen Mitteln, wie Fungiziden, verhindert werden.

Zum Einfluss der Niederschläge auf den Befall mit Mehltau gibt es auch zahlreiche Arbeiten, in denen kein Zusammenhang gefunden wurde. Merchán (1984) zeigte, dass möglicherweise die Erniedrigung der Temperatur an Regentagen einen größeren Einfluss auf den Befall hat, als der Regen selbst. Merchán & Kranz (1986b) konnten in ihren Versuchen zu Auswirkungen veränderter Feuchtigkeits- und Strahlungsbedingungen bei einem ähnlichen Versuchsaufbau mit zum Teil überdachten und teilweise auch zusätzlich beregneten Weizenpflanzen keinen Einfluss der Niederschläge auf den Befall von Weizen mit *Erysiphe (Blumeria) graminis* ausmachen. Obwohl in ihren Versuchen besonders bei den mit Regenschutz versehenen Pflanzen zu Beginn der Untersuchung verhältnismäßig viele Kolonien pro Haupthalm gezählt wurden, konnten nach fünf Wochen Versuchsdauer zwischen den Varianten keine Unterschiede mehr ausgemacht werden. Die Autoren kommen deshalb zu dem Schluss, dass keine Auswirkungen des Niederschlags vorliegen. Diese Behauptung unterstützen auch die Untersuchungen von Aust (1981) und Hau (1985). Merchán & Kranz (1986b) weisen jedoch selbst darauf hin, dass eine abschließende Aussage zu der Auswirkung des Regens noch nicht möglich war. Generell kann jedoch zusammengefasst werden, dass die Bedeutung von Mehltaupilzen bei Zunahme von Regenfällen deutlich abnimmt (Schnathorst, 1965).

Dies kann sowohl auf die Beeinträchtigung der Pilze durch den Regen, wie auch auf die Selbstreinigung vieler unbenetzbarer Pflanzen zurückgeführt werden.

Probleme bei der Befallsbestimmung

Verglich man den visuellen Befall von *N. nucifera* mit den erfassten Flächendaten, fiel auf, dass trotz außerordentlich starkem Pilzbewuchs deutlich geringere Flächenanteile ermittelt wurden. Besonders die Abb. 5.16b spiegelt diese Problematik wider. Bei der Variante D (S4) wurde in der dritten Woche im Mittel ein Flächenbefall von 21-30% gefunden, in der Abbildung ist jedoch nahezu die gesamte Oberfläche mit Pilz bewachsen. Diese Unterschiede können auf zwei Umstände zurückgeführt werden. Zum einen wurden ausschließlich Trockenpräparate untersucht. Die Trocknungsartefakte haben sich besonders bei den Pilzhyphen ausgewirkt. Zum Teil waren diese derart deformiert, dass von einem Hyphenschlauch nur noch ein feiner Strich bei gegebener Vergrößerung zu sehen war. Dieser Trocknungsartefakt verringerte die tatsächlich durch Pilz belegte Fläche. Zum anderen wurde das Wachstum des Pilzes in die Höhe nicht mit erfasst. Das makroskopische Erscheinungsbild wird unter anderem durch den Pilzwuchs in die Höhe beeinflusst. Dadurch erscheint die Oberfläche stärker befallen zu sein, als sie es tatsächlich ist. Bei der Flächenbestimmung im REM waren die aufrecht stehenden Konidiophoren kollabiert und wirkten sich auf die Flächenbelegung daher kaum aus.

Ein zweites Problem bei der Erfassung der Pilzbelegung liegt in der Wuchsform des Pilzes. Wie beschrieben und auf den Abb. 5.6 u. 5.16a zu erkennen, bildet das Mycel kleine runde Flecken. Erst in einer viel späteren Befallsphase schließen diese sich zu einem weißlichen „Mycel-Teppich“ zusammen. Da eine lokal beschränkte Beprobung der Oberflächen stattfand und die Verpilzung teilweise sehr heterogen ausfiel, müssen die Belegungsdaten eines Beprobungstermins nicht immer den tatsächlichen Befall widerspiegeln. Deshalb sind auch die Schwankungen der Daten sehr groß und der Befall in der darauf folgenden Woche konnte plötzlich geringer ausfallen als in der Woche zuvor (vgl. Abb. 5.13: Variante oDb in Woche 4 und 5). Dieser Effekt hätte nur durch mehr Proben reduziert werden können. Dadurch wäre aber wiederum die Untersuchungsdauer stark eingeschränkt worden, da die Flächenanteile ausgestanzter Felder zugenommen und die Vitalität der Blätter abgenommen hätten.

5.6 Folgerungen

Oidium spec. hat offenbar eine Anpassung entwickelt, die superhydrophobe, selbstreinigende Oberfläche von Lotus zu besiedeln. Er verbreitet sich hauptsächlich unter trockenen Bedingungen und bringt das für die Keimung notwendige Wasser vermutlich selbst mit. Besonders im Spätsommer sind die Pflanzen einem verstärkten Befall ausgesetzt. Nach trockeneren Perioden ist das Risiko eines Befalls besonders hoch.

Obwohl *Nelumbo nucifera* inzwischen in der Literatur gleichbedeutend für Selbstreinigung zitiert wird und die Oberfläche einen effektiven Schutz vor Verschmutzung darstellt (Barthlott & Neinhuis, 1997), haben einige wenige Mehltaupilze einen Weg gefunden diesen Schutzmechanismus zu umgehen.

Die Strategie zur Besiedlung superhydrophober Oberflächen scheint auf schneller Keimung und Etablierung zu beruhen, die höchstwahrscheinlich durch die Mitnahme eines eigenen Wasservorrats ermöglicht wird. Für diese Art der Keimung wird hier erstmals der Begriff „autohydrogerm“ vorgeschlagen, wenn auch ein direkter Beweis des Wasservorrats von *Oidium spec.* noch ausgeblieben ist. Es wird vermutet, dass bei zahlreichen weiteren Pathogenen, die auf direktem Weg (nicht über beschädigte Pflanzenteile oder über Stomata) die Superhydrophobie umgehen, ein eigener Wasservorrat eine wichtige Rolle spielt und „autohydrogerme“ Keimung vorliegt.

In wieweit auch für technische superhydrophobe Oberflächen, für die Lotus als Vorbild dient, befürchtet werden muss, dass Mikroorganismen den Schutzmechanismus umgehen können, ist noch nicht geklärt. Für die überwiegende Anzahl von Mikroorganismen stellt Feuchtigkeit einen entscheidenden Faktor für eine Besiedlung dar. Erst in Zukunft wird sich zeigen, ob Mikroorganismen auch eine Anpassung an trockene superhydrophobe technische Oberflächen finden werden. Diese Möglichkeit kann zumindest nicht ausgeschlossen werden.

6. Modellsystem Algen und Baustoffe: Wachstum in Abhängigkeit der Benetzbarkeit

In den vorangegangenen Kapiteln konnte gezeigt werden, dass superhydrophobe biologische Oberflächen einen effektiven Schutz gegen den Befall mit Mikroorganismen darstellen, jedoch Strategien existieren, die eine Besiedlung auch solcher Substrate ermöglichen. Im vorliegenden Kapitel stehen nun technische Oberflächen im Mittelpunkt der Betrachtung. Die Übertragung selbstreinigender Eigenschaften auf technische Materialien ist heute dank zahlreicher Verfahren problemlos möglich (vgl. Kap. 3). Vor allem für Baustoffe stellt sich aber die wichtige Frage, inwieweit eine Selbstreinigung die Oberflächen vor Besiedlung mit Mikroorganismen (MO) schützt. Besonders Bakterien, Pilze und Algen sorgen im Freiland für unerwünschte Korrosion von Baustoffen, die mehr als nur ein ästhetisches Problem darstellt (Mutzke, 2004).

Inzwischen suchen Baustoffhersteller in zunehmendem Maße nach Lösungen für die Vermeidung von MO-Bewuchs, um teure Regressforderungen zu vermeiden. Zu dieser Thematik wurden umfangreiche Freilanduntersuchung durchgeführt (z. B. Nay, 2002; Sedlbauer *et al.*, 2006) oder fanden Untersuchungen an und Beurteilungen von Fallbeispielen (Jatzek *et al.*, 2002) statt. Ebenso wurde in aufwendigen Laboruntersuchungen nach der Lösung des MO-Problems gesucht (z.B. (Messal, 2006). Zwei Faktoren haben in den letzten Jahren die Diskussion über MO an Baustoffen verstärkt. Durch die zunehmende Wärmedämmung steigt die Anzahl der Problemfälle mit MO in einigen Gegenden dramatisch an (Jatzek *et al.*, 2002; Pätzold, 1988; Sidler, 2000). Außerdem drängen immer mehr funktionale, selbstreinigende Oberflächen auf den Markt (Møller, 2002b), deren Wirksamkeit, hauptsächlich vor dem Hintergrund eines Verdrängungswettbewerbs, sehr in Frage gestellt wird. Die Ergebnisse der in der Literatur publizierten Studien sind außerordentlich heterogen. Als Einflussfaktoren auf den Bewuchs werden Temperatur, Sonnenscheindauer, Mikroklima, Chemie der Oberfläche, Biozidwirkung, -verfügbarkeit und -mobilität, Kondensation, Wasserkapazität und -verfügbarkeit, Saugvermögen der Proben und vieles mehr diskutiert. Einer der Schlüsselfaktoren ist die Verfügbarkeit von freiem Wasser auf der Oberfläche (Brill, 1994; Raddatz, 1989; Siebert, 1994). Entsprechend werden stets konstruktive Maßnahmen zum Schutz vor Regen empfohlen (bsp. (Kastien, 1999a, b; Rusam, 1989)).

In der vorliegenden Studie wurde ausschließlich der Einfluss der Benetzbarkeit auf die Etablierung von MO an Fassadenfarben und Dachziegeln betrachtet. Aufgrund ihrer leichten Nachweisbarkeit über ihre Chlorophyllfluoreszenz wurden die Untersuchungen mit aeroterrestrischen Algen durchgeführt. Als Testoberflächen wurden sowohl konventionelle, wie auch selbstreinigende Baustoffe gewählt.

Die folgenden Kapitel geben eine kurze Einführung zum Stand des Wissens über aeroterrestrische Algen, mikrobielle Materialzerstörung und ihre Simulation.

6.1 Algen

Algen bilden keine systematische Einheit. Vielmehr werden unter den Begriff „Algen“ eukaryotische, primär photoautotrophe Lebewesen zusammengefasst, die keine Archegoniaten oder Telomophyten sind. Dazugerechnet werden auch sekundär chlorophyllos gewordene farblose Algen, ebenso wie die früher den Protozoen zugeordneten Phytoplagen (Sitte *et al.*, 2002). Eine sehr gute Übersicht über die Algen und ihre phylogenetische Stellung findet sich bei van den Hoek *et al.* (1995). Neuere molekularbiologische Ansätze basierend auf Plastiden- oder Mitochondriengenomen wälzen die bisherigen Verwandtschaftsverhältnisse der Algen um. Aktuelle Zusammenfassungen der molekularbiologischen Ergebnisse und die Auswirkungen der Daten auf die Phylogenie der Algen liefern Andersen (2004), Saunders & Hommersand (2004), López-Bautista *et al.* (2006), Friedl (1998) und Lewis & McCourt (2004).

Algen sind die Hauptproduzenten von Sauerstoff auf der Erde. Es gibt kaum einen Lebensraum, das Algen nicht besiedeln. Zwar haben sie ihre Hauptverbreitung in marinen Habitaten, sie kommen aber auch im Süßwasser, in allen Bodentypen, auf natürlichen Substraten, ebenso wie auf technischen Materialien, auf Pflanzen und sogar in Schneefeldern und auf Eis vor (Hoffman, 1989). Algen existieren in einem weiten Temperaturbereich und tolerieren teilweise stark saure, teils stark alkalische Bedingungen (Elster *et al.*, 2002). Einen guten Überblick über die globale Verbreitung der Algen und ihre ökologische Bedeutung geben Round (1981) sowie Ettl (1980).

Für die vorliegende Arbeit sind ausschließlich Mikroalgen von Interesse, die in der Lage sind, terrestrische Habitate, wie beispielsweise Felsen oder Mauern, zu besiedeln. Auf diese im Folgenden als aeroterrestrisch bezeichneten Algen wird näher eingegangen.

Aeroterrestrische Algen

Die Definition der aeroterrestrischen Algen ist schwierig, da je nach Literatur entweder nur obligat bodenbewohnende Algen oder zusätzlich fakultativ bodenbewohnende Luftalgen und manchmal sogar kryophytische Schneevalgen in dieser Kategorie zusammengefasst werden. Ettl & Gärtner (1995) schlugen eine Unterteilung der aeroterrestrischen Algen in die zwei Hauptkategorien „aerophytisch“ und „terrestrisch“ vor.

Aeroterrestrische Algen bilden in terrestrischen Ökosystemen für viele heterotrophe Organismen organische Substanz als Nahrungsquelle. Eine ausführliche Übersicht über ihre Ökologie und Funktion geben Hoffman (1989), Oesterreicher (1990) und Metting (1981, 1990). Aeroterrestrische Algen werden über die Luft verbreitet (Broady, 1979; Kristiansen, 1996; Schlichting, 1961; Sharma *et al.*, 2006; Singh, 1981) und gelangen entweder durch Sedimentation oder mit dem Regen auf Substrate (Baumann, 1979; Broady, 1979; Brown *et al.*, 1964; Cox & Wathes, 1995; Eckhardt, 1996; Lighthart & Mohr, 1994; Mandrioli, 1998; Schlichting, 1964).

Viele der aeroterrestrischen Algensippen sind weltweit verbreitet (Archibald, 1990; Metting, 1990). Je nach Literatur fällt ihre Anzahl unterschiedlich aus. Metting (1981) und Ettl & Gärtner (1995) geben in einer weltweiten Übersicht etwa 170 Gattungen und ca. 1000 Arten an.

Eine zunehmende Bedeutung gewinnen die aeroterrestrischen Algen als Besiedler von Baustoffen (Gaylarde & Gaylarde, 2000; Kumar & Kumar, 1999; Schumann *et al.*, 2004; Schumann *et al.*, 2005; Wright, 1986). Ihr Vorkommen auf den von Menschen verwendeten Materialien hat ästhetische wie auch bauphysikalische Auswirkungen (Ariño & Saiz-Jimenez, 1996; Favali *et al.*, 2000; Perrichet, 1987). Auf letztere wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

6.2 Mikrobielle Materialzerstörung

Mikroorganismen (MO) übernehmen im Stoffkreislauf der Natur eine zentrale Rolle beim Recycling organischer und anorganischer Stoffe (Ehrlich & Brierley, 1990). Gleichzeitig greifen sie aber auch die vom Menschen als Werkstoffe verwendeten Materialien in einem Umfang an, der lange unterschätzt wurde (Bock & Sand, 1993; Brennenstuhl & Doherty, 1991; Brill, 1995; Flemming, 1994; Sand & Bock, 1991; Vieser, 1987). Die „mikrobiell induzierte Korrosion“ (MIC) ist ein fundamentaler natürlicher Prozess, der auch vor Werkstoffen nicht Halt macht. Dabei können alle

Materialien inklusive Metalle, mineralische und organische Werkstoffe oder Kunststoffe von den MO angegriffen werden. Um die Verwitterungs- und Korrosionsprozesse bei Materialien aufzuhalten, werden teilweise sehr kosten- und energieintensive Schutzmaßnahmen unternommen. Je besser jedoch ein Material während des Gebrauchs gegen einen mikrobiellen Angriff geschützt wird, desto größer sind später die Probleme bei der Abfallbeseitigung, da die biologischen Zersetzungsprozesse entsprechend langsam verlaufen oder sogar unterbunden werden (Brill, 1995).

Seit einigen Jahren wird die Beeinträchtigung der Funktion von Werkstoffen und ihre Zerstörung durch Mikroorganismen intensiv erforscht. Lagern sich MO an Grenzflächen an, bilden sie Biofilme. Diese mikrobiellen Beläge bestehen nicht nur aus den Mikroorganismen, sondern auch aus produzierten extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) (Sutherland, 2001), die die Eigenschaften der besiedelten Oberfläche massiv verändern können. Biofilme sind komplex aufgebaut und unterliegen teilweise starken Veränderungen, die durch eine zeitliche Sukzession hervorgerufen werden. Eine gute Übersicht über Biofilme, ihre Eigenschaften und Zusammensetzung liefern Characklis & Wilderer (1989), Christensen & Characklis (1990), Costerton (2004), Flemming (1995), Morton & Surman (1994), van Loosdrecht & Tjihuis (1995) sowie Wimpenny (2000). Speziell über den Aufbau von Algenbiofilmen berichten Callow (2000), Leadbeater & Callow (1992) und Ortega-Calvo *et al.* (1995).

Die ökonomischen Folgen der mikrobiellen Zerstörung nehmen inzwischen wirtschaftlich relevante Größenordnungen an (Gaylarde *et al.*, 2003; Kobrin, 1993; Sand & Bock, 1991). Von allen Schäden bei Baustoffen gehen schätzungsweise 10-20% auf mikrobielle Zerstörung zurück (Hüster, 1997). Bei einer Gesamtsumme von 20-30 Mrd. €, die jährlich in Deutschland für Bauschäden aufgewendet werden, entspricht dies 2-4 Mrd. € (Heitz *et al.*, 1996). Die Ursachen der Zerstörungen sind vielfältig (Abb. 6.1) und abhängig von den beteiligten MO und dem Material (Palmer Jr. & Hirsch, 1996; Warscheid & Krumbein, 1996). Über die Zerstörung keramischer oder anorganischer Werkstoffe berichten Sand (1994, 1996), Sand *et al.* (1989), Sand & Bock (1990, 1991). Übersichtsarbeiten über die Schädigungsmechanismen bei Fassadenfarben oder organischen Beschichtungen finden sich bei Brill (1990), Ciferri (1999), Flemming (1998), Perrichet (1987) und Siebert (1994). Eine gute Übersicht über die Mechanismen der Zerstörung und die Gegenmaßnahmen liefern Brill (1995), Heitz *et al.* (1996) und Warscheid & Krumbein (1994a).

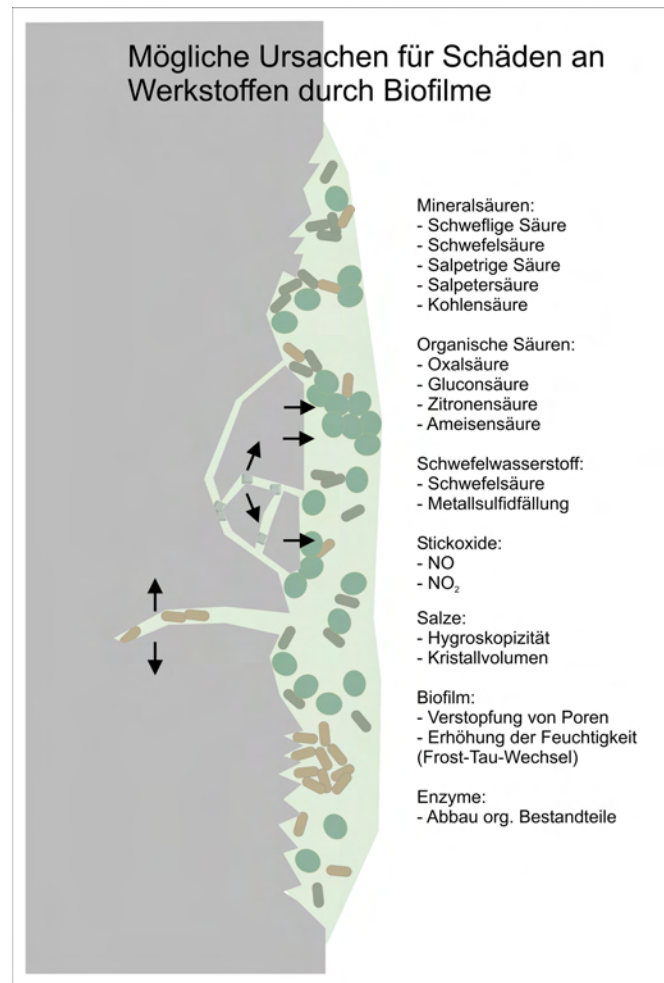


Abb. 6.1: Schädigungsmechanismen bei Werkstoffen hervorgerufen durch Biofilme; Pfeile: Rissbildung oder Abplatzen durch Salze, Feuchtigkeit und Frost-Tau-Wechsel

Die Methoden zum Schutz von Werkstoffen sind unterschiedlich und können in aktive und passive Maßnahmen eingeteilt werden (Sand, 1995) (Tab. 6.1). Aktive Maßnahmen beinhalten Verfahren, die sich direkt gegen die Mikroorganismen selbst richten. Dazu gehören physikalische oder chemische (toxische) Verfahren. Die passiven Maßnahmen wiederum beinhalten Verfahren, welche eine Besiedlung oder Ausbreitung erschweren oder unterbinden und sich damit indirekt auf die Mikroorganismen auswirken (Brill, 1994).

Aktive Maßnahmen, wie die Desinfektion von Materialien durch Hitze oder Bestrahlung, sind nicht überall anwendbar. Zudem haben sie den Nachteil, dass sie energieaufwendig und damit auch kostenintensiv sind. Für die meisten Anwendungen im Freiland kommen bislang deshalb fast ausschließlich chemische Gegenmaßnahmen in Frage. Die gebräuchlichste Methode, um Baustoffe im Freiland vor MO-Besiedlung zu schützen, ist der Einsatz von Bioziden (Antoni-Zimmermann & Hahn, 1997; Glaser, 1998; Lindner *et al.*, 1997; Lindner, 2005; Wunder, 2004). Diese müssen als Schutz

jedoch nicht immer lange anhalten (Shirakawa *et al.*, 2004). Ein guter Überblick über häufig verwendete Biozide und ihre Wirkmechanismen findet sich bei Paulus (2005). Die bislang eingesetzten Biozide müssen jedoch einer neuen EU-Gesetzgebung gerecht werden (Schmidt-Sonnenschein, 2005), die deren zukünftigen Einsatz fragwürdig erscheinen lässt. In den letzten Jahren stieg daher der Substitutionsdruck für Biozide (Flemming, 1996). So wird sowohl nach neuen, wirkspezifischeren Bioziden mit geringerer Human- und Ökotoxizität, wie auch nach Alternativen für Biozide gesucht. Dabei richtet sich ein Fokus auch auf die Oberflächen der Materialien (Benedix *et al.*, 2000; Møller, 2002a; Venzmer, 2006).

Tab. 6.1: Mögliche Schutzmaßnahmen gegen MO-Bewuchs (verändert nach Sand, 1995)

Aktive Maßnahmen	Passive Maßnahmen
Physikalische Gegenmaßnahmen - Hitzeeinwirkung - Bestrahlung	Standortwahl - z. B. Berücksichtigung des Mikroklimas und der Mikrogeographie
Chemische Gegenmaßnahmen - Antibiotika (spezifisch) - Biozide (unspezifisch) Giftige Gase (z.B. SO ₂ , O ₃ oder Ethylenoxid)	Werkstoffwahl - z. B. Verwendung schwer besiedelbarer Materialien
	Konstruktive Möglichkeiten - z. B. Vermeidung von Feuchtigkeit durch ausreichende Dachüberstände oder die Verwendung funktionaler Oberflächen

Durch Veränderung der Oberflächen lassen sich zahlreiche neue Funktionen integrieren, die einen Bewuchs mit Mikroorganismen verringern oder sogar vollständig unterbinden können. In der vorliegenden Arbeit werden selbstreinigende, superhydrophobe Oberflächen, die eine Abreinigung von Schmutz durch bewegtes Wasser erreichen (vgl. Kap. 3.1), im Vergleich mit anderen gängigen Oberflächen untersucht. Bislang existieren in Bezug auf die funktionalen Oberflächen kaum Erkenntnisse darüber, in wieweit allein die Oberflächenfunktion einen Schutz gegenüber der Besiedlung gewährleistet.

6.3 Simulation mikrobieller Besiedlung

Die Notwendigkeit der Erforschung und Entwicklung neuer praxisorientierter Testverfahren für Oberflächen wurde bereits 1992 von dem „Institute of Materials, Minerals and Mining“ (London) im Rahmen der „European Federation of Corrosion

Publications“ gefordert (Schweisfurth & Heitz, 1992). Gängige Testverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie ausschließlich die Biozidwirksamkeit prüfen (bsp. Anton-Zimmermann & Hahn, 1997; Lindner *et al.*, 1997). Solche Testverfahren versagen jedoch vollständig, wenn die Funktion einer Oberfläche eine Rolle spielt. So wird beispielsweise die Anfälligkeit von Fassadenfarben gegenüber Algen- und Pilzbefall mittels standardisierter Tests überprüft. Die so genannten VdL-Richtlinien (Verband der Lackindustrie e.V., 1998) beschreiben Verfahren, bei denen in Petrischalen liegende Probenkörper für mehrere Wochen komplett mit Algen- bzw. Pilzsporensuspensionen bedeckt werden. Die Betrachtung der physiko-chemischen Grundlagen von selbstreinigenden superhydrophoben Oberflächen macht hingegen deutlich, dass solche Verfahren für die Beurteilung funktionaler Oberflächen völlig ungeeignet sind. Bei funktionalen Oberflächen spielt bewegtes Wasser eine ganz entscheidende Rolle.

Um Aussagen darüber treffen zu können, wie anfällig ein Baustoff gegenüber dem Befall mit Mikroorganismen (MO) ist, können unterschiedlichste Untersuchungen durchgeführt werden (Allsopp & Seal, 1986). Die einfachste Möglichkeit zu prüfen, wie schnell und wie stark ein Baustoff mit MO besiedelt wird, ist die Freilandexposition (Künzel *et al.*, 2001; Künzel & Sedlbauer, 2001; Young & Urquhart, 1996). Die Freilandexposition erlaubt als einzige Methode eine Aussage darüber, wie sich ein Baustoff unter natürlichen Bedingungen im Verlauf der Zeit verhält (Allsopp & Seal, 1986; Nay & Raschle, 2004; Yeager, 1968). Jedes Material, das später im Freiland eingesetzt werden soll, durchläuft eine solche Prüfung (Scott, 1994). Diese Methode hat jedoch einen entscheidenden Nachteil: Es kann mehrere Jahre dauern, bevor ein aussagekräftiges Ergebnis vorliegt. Oft kann bei der Entwicklung neuer Baustoffe eine solch lange Zeitspanne nicht abgewartet werden. Deshalb werden zahlreiche Laboruntersuchungen durchgeführt, die eine Einschätzung der Eignung der Materialien für Freilandanwendungen ermöglichen. In Klimakammern mit simulierten Belastungen wird die Alterung der Baustoffe in Zeitraffer dargestellt (Konditionierung). Bis auf wenige Ausnahmen (vgl. Ehrich & Bock, 1996; Eul & Heitz, 1996; Guillitte & Dreesen, 1995; Mansch & Bock, 1996; Souza & Gaylarde, 2002; Tatnall, 1986) werden im Labor jedoch nicht die biologischen Komponenten mit einbezogen, da die Simulation natürlicher Besiedlungsprozesse sehr schwierig ist (Ross *et al.*, 1968).

Im Freiland spielen bei der Besiedlung von Baustoffen viele Faktoren eine Rolle (Eckhardt, 1996; Warscheid & Krumbein, 1996). Neben den Umweltfaktoren (Hoffman, 1989) müssen die richtigen Primärbesiedler vorhanden sein und günstige

bauphysikalische und chemische Bedingungen vorliegen (Raschle, 1998; Warscheid & Krumbein, 1994b). Erst dann kann ein Wachstum auf technischen Materialien stattfinden. Die Kenntnis und Integration dieser Faktoren stellt den Schlüssel zur erfolgreichen Simulation der Besiedlung von Baustoffen im Laborexperiment dar (Hilge *et al.*, 1998; Warscheid, 2000).

Zahlreiche Umweltfaktoren erschweren oder erleichtern die Besiedlung von Baustoffen (Bagda *et al.*, 1999; Christoffer & Hoffmann, 1989; Hirsch, 1986; Künzel, 2001; Raddatz, 1989). Wasserverfügbarkeit, Strahlung, Temperaturmaxima und -minima ebenso wie Temperaturwechsel spielen bei der Besiedlung eine wichtige Rolle (Ariño, 1996; Büchli & Raschle, 2004; Hopton, 1988; Schumann *et al.*, 2004). Je nach Mikroalge werden unterschiedliche Ansprüche an die Umweltbedingungen gestellt. So ertragen beispielsweise aeroterrestrische Algen stärkere Sonneneinstrahlung als Mikroalgen in Gewässern. Deshalb finden sich Algen an Baustoffen häufig an abgeschatteten oder nach Norden ausgerichteten Standorten (Schumann *et al.*, 2002).

Ein Schlüsselfaktor ist die Feuchtigkeit. Bis auf einige an Trockenstress angepasste aeroterrestrische Mikroalgen der Tropen benötigen die meisten Mikroalgen entweder sehr hohe Luftfeuchtigkeiten (Ehresmann & Hatch, 1975) oder tropfbares Wasser zum Überleben. An Gebäuden werden daher häufig die Stellen zuerst besiedelt, welche direkt bei Regen benässt werden oder längerfristig feucht bleiben (Häubner *et al.*, 2006; Rusam, 1989). In diesem Zusammenhang wird in letzter Zeit besonders die Bedeutung der Kondensation an Gebäuden diskutiert (Jatzek *et al.*, 2002; Kastien, 2004; Venzmer & Messal, 2003). Mit der zunehmenden Wärmedämmung von Gebäuden kann es durch IR-Abstrahlung des Mauerwerks in den Nächten zu einer Unterschreitung des Taupunktes und damit zum Auftreten von Kondensation an einer Fassade kommen (Blaich, 1999). Während früher dieses Risiko nur in den Wintermonaten existierte, kann die Gefahr von Kondenswasser bei wärmegeämmten Fassaden auf sechs Monate im Jahr steigen (Büchli & Raschle, 2004). Karsten *et al.* (2003) bringen die gestiegene Anzahl an Problemen mit Algen an Fassaden auch mit der Änderung der klimatischen Verhältnisse in Deutschland in Zusammenhang.

Die Temperatur spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Exponierte Stellen mit hohen Sommertemperaturen und starken diurnalen Temperaturwechseln sind oft mit weniger Algen belastet als Oberflächen mit gemäßigten Temperaturen und Temperaturwechseln (Karsten *et al.*, 2005). Über die unterschiedlichen Anpassungen

von Algen an die Bedingungen auf Baustoffen berichten Karsten *et al.* (2003) und Schumann *et al.* (2002).

Die Einstellung der Umweltbedingungen im Laborexperiment kann das Ergebnis der Untersuchungen fundamental beeinflussen. Ungünstige Parametereinstellungen führen selbst bei der Verwendung relevanter Primärbesiedler zu keinem Wachstum. Entsprechend müssen sich die Umweltbedingungen hauptsächlich an den Ansprüchen der Mikroorganismen orientieren, um eine Simulation der natürlichen Besiedlung zu ermöglichen (Hoffman, 1989).

Da die Simulation der Besiedlung im Labor ein multifaktorielles Problem darstellt, müssen entsprechend viele Aspekte bei dem Design des Versuchs-Setups bedacht werden. In Anbetracht der Verwendung von selbstreinigenden Baustoffen sollten im Rahmen dieser Simulation die Funktionen der Oberflächen möglichst wenig beeinträchtigt und zudem die im Freiland ablaufenden Prozesse nachgeahmt werden. Algen gelangen im Freiland hauptsächlich über Luft oder Regen an die Baustoffe (Baumann, 1979; Eckhardt, 1994). Je nach Oberfläche können sie sich dort anheften und etablieren oder werden „abgewehrt“. Die physiko-chemische Abwehr der Oberflächen wiederum kann nur funktionieren, wenn auch die Bedingungen dafür vorliegen. In den hier vorgestellten Versuchen lag das Hauptaugenmerk beim Versuchsaufbau deshalb auf fünf Parametern:

- i. Simulation natürlicher Depositionswege der Algen
- ii. Verwendung „besiedlungsaggressiver“ Algen
- iii. Simulation von Niederschlagsereignissen
- iv. Berücksichtigung natürlicher Einflussfaktoren (z.B. UV-Strahlung)
- v. Nicht-invasive Analysemethode (Reduktion der Probenanzahl)

6.4 Chlorophyllfluoreszenz

Die Analyse der Besiedlung von Baustoffen mit Algen erfolgte in dieser Arbeit mittels Messung der Chlorophyllfluoreszenz-Intensität. Chlorophyll a emittiert bei Anregung mit blauem oder grünem Licht die Anregungsenergie zum Teil in Form von rotem Fluoreszenzlicht (Emissionsmaximum $\lambda = 685\text{nm}$). Unabhängig von dem absorbierten Photon ist das Fluoreszenzlicht des Chlorophylls stets rot, weil die Quanten immer beim Übergang des ersten angeregten Singulett-Zustands in den Grundzustand emittiert werden (Sitte *et al.*, 2002). Die Chlorophyllfluoreszenz findet in den Pflanzenwissenschaften und in der Phykologie eine breite Anwendung (z.B. Daley *et al.*,

1989; Doerffer, 1988; Duysens & Sweers, 1963; Kiefer *et al.*, 1989; Lichtenthaler, 1988; Renger & Schreiber, 1986). Auch bei Baustoffen wird mittlerweile die Besiedlung mittels Chlorophyllfluoreszenz erfasst (Olson *et al.*, 1986). Die Fluoreszenz dunkeladaptierter Algen ist weitestgehend proportional zur Chlorophyll a-Konzentration (Schumann *et al.*, 2005). Dunkeladaptation, photochemische Prozesse zur Erzeugung von Energie, Wärmeverlust, Dauer der Beleuchtung ebenso wie die „Fitness“ der Zellen spielen eine Rolle bei der Interpretation gemessener Chlorophyllfluoreszenz (Falkowski & Kiefer, 1985). Detaillierte Darstellungen der komplexen photochemischen Zusammenhänge finden sich beispielsweise bei Falkowski & Kiefer (1985), Maxwell & Johnson (2000) und Bolhar-Nordenkamp & Öquist (1993) und über das zeitliche Verhalten der Chlorophyll a-Fluoreszenz in der Grundlagenarbeit von Kautsky & Hirsch (1931). Eine sehr ausführliche Zusammenfassung zum Thema Chlorophyllfluoreszenz findet sich in dem Review von Krause & Weis (1991). Mit der Analyse der Chlorophyllfluoreszenz bei eukaryotischen Algen und Cyanobakterien im Speziellen haben sich Schreiber *et al.* (1995) beschäftigt.

6.5 Material und Methoden

Verwendete Algen

Für die Versuche wurden Algenisolate von unterschiedlichen Baustoffen entnommen, aufgereinigt und kultiviert. Die Entnahme erfolgte von technischen Oberflächen in den Botanischen Gärten der Universität Bonn (Fassade, Betonsockel, Metallrahmen, verzinkter Pfosten). Nach der Aufreinigung und Separation der Algen wurden für die Inokulationen die Einzelisolate wieder zu einer Mischsuspension vereint. Diese Mischsuspension umfasste folgende Algentaxa:

Klebsormidium flaccidum (Kützing) Silva, Mattox & Blackwell

Stichococcus bacillaris Nägeli

Tetracystis spec.

Chlorococcum spec.

Die Bestimmung der Algen erfolgte durch Dr. Gijsbert Lokhorst, Nationalherbarium der Niederlande, Leiden (NL). Darüber hinaus waren an Algenbestimmungen Dr. Georg Gärtner von der Universität Innsbruck sowie Prof. Dr. Thomas Friedl von der Universität Göttingen beteiligt.

Die Dauerkulturen der Algen wurden auf Schrägagar (Bold's Basal Medium nach Stein, 1973) bei 18-19°C gehalten. Diese Stammkulturen wurden alle drei Monate überimpft. Aus den Stammkulturen wurden Gebrauchskulturen hergestellt, die bei ihrem Einsatz in Experimenten zwischen drei und sechs Wochen alt waren.

Für die Inokulationen wurden große Mengen der Algen benötigt. Dafür wurden diese bei schwacher Dauerbeleuchtung auf Kreisschüttlern, zunächst in 500mL Erlenmeyerkolben, nach Aufkonzentration in 1L Erlenmeyerkolben bei 18-19°C kultiviert. Als Flüssigmedium wurde erneut das Bold's Basal Medium (s.o.) verwendet.

Technische Oberflächen

Als technische Oberflächen wurden unterschiedliche Fassadenfarben und Dachziegel verwendet. Filterpapier diente in der Untersuchung als Wachstumskontrolle. Alle Proben, bis auf die Dachziegel hatten eine Größe von 10x15 cm. Bei den Dachziegeln lag eine Probengröße von 8x15 cm vor.

Die nachfolgende Tabelle (6.2) gibt einen Überblick über die technischen Oberflächen, die im Rahmen dieser Untersuchung Verwendung fanden.

Tab. 6.2: Übersicht der verwendeten Proben inklusive ihrer Versuchsbezeichnungen

Fassadenfarben		
Probenbezeichnung	Bemerkung	Versuchsbezeichnung
Fassadenfarbe Dispersion	Handelsübliche Dispersionsfarbe	FW
Fassadenfarbe Silikat	Handelsübliche Silikatfarbe	FV
Fassadenfarbe Silikonharz	Handelsübliche Silikonharzfarbe	FU
Fassadenfarbe Funktional	Selbstreinigende Fassadenfarbe „Lotusan®“	FT
Dachziegel		
Dachziegel Konventionell 1	Handelsüblicher Tondachziegel schwarz	DE
Dachziegel Konventionell 2	Handelsüblicher Tondachziegel rot	DA
Dachziegel Funktional 1	superhydrophober Dachziegel	DL
Referenz-Oberfläche		
Filterpapier	Verwendet als Wachstumskontrolle	P

Von jeder Baustoffvariante dienten jeweils fünf Proben als Parallelen und drei Proben als Kontrollen für die Fluoreszenzänderung. Die Kontrollen wurden nicht mit Algen inokuliert, ansonsten jedoch gleich behandelt (s.u.). Die Probe „Filterpapier“ diente als Wachstumskontrolle, da auf diesem Substrat wegen der guten Benetzbarkeit, Wasserkapazität und der Oberflächenrauigkeit optimale Bedingungen für das Wachstum der Algen vorlagen. Auch in diesem Fall wurde mit fünf Parallelen und drei Kontrollen gearbeitet.

Die Fassadenfarben waren auf Styropor gestrichen, das zuvor mit einer Grundierung beschichtet wurde. Für die Versuche wurden ausschließlich biozidfreie Farben verwendet, um eine Vergleichbarkeit der Farben untereinander zu gewährleisten. Auch die Dachziegel waren biozidfrei. Das Filterpapier wurde auf Kunststoffplatten aufgezogen und an der Rückseite des Kunststoffs festgeklebt.

Kontaktwinkelmessung

Die Kontaktwinkelmessungen der Proben erfolgten wie in Kap. 2.2 beschrieben. Die Fassadenfarben, ebenso wie die Kunststoffproben wurden für die Messungen mittels

einer Dekupiersäge (Typ DS 230/E, Proxxon, Niersbach) zerschnitten. Die Dachziegel wurden mit Hammer und Meißel zerkleinert. In diesem Fall wurden Splitter mit unbeschädigter Oberfläche vermessen. Die Filterpapierproben wurden mit einer Schere ausgeschnitten und mittels doppelseitigem Klebeband (Tesa Fix Doppelband, Tesa, Hamburg) auf einem Glasobjektträger aufgeklebt.

Rasterelektronenmikroskopie

Die Dokumentation der Probenoberflächen erfolgte mittels Rasterelektronenmikroskopie (s. Kap. 2.2). Die Aufnahmen der Oberflächen befinden sich im Anhang auf Bildtafeln 14-19.

Die Zerkleinerung der Proben für die REM-Untersuchung erfolgte bei den Fassaden, den Dachziegeln und dem Filterpapier wie bei „Kontaktwinkelmessung“ (s.o.) beschrieben. Die übrige REM-Präparation erfolgte gemäß den Angaben in Kap. 2.2.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau bestand im Wesentlichen aus vier Stationen, die in einem wöchentlichen Zyklus durchlaufen wurden: Deposition der Algen auf den Baustoffen, Wachstumsphase in einer Klimakammer (Inkubation), Niederschlagssimulation und Analyse des Bewuchses (Abb. 6.2).

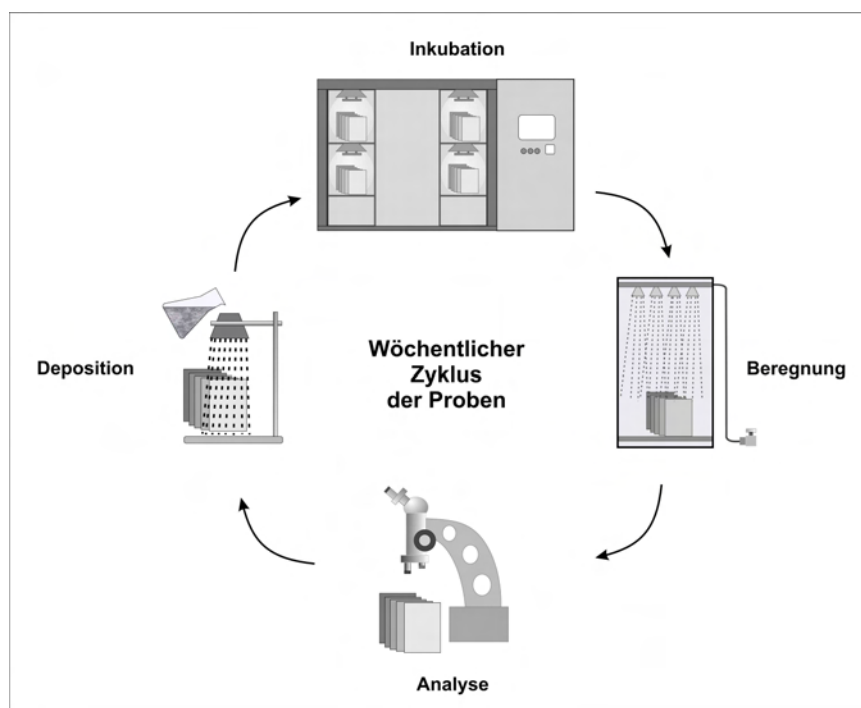


Abb. 6.2: Versuchsaufbau zur Simulation der Besiedlung von Baustoffen mit Algen

Die Simulation der natürlichen Deposition erfolgte in Form einer Nassinokulation (vgl. Absch. Inokulation der Prüfkörper). Während der Inkubationsphase befanden sich die Probekörper in einer Klimakammer (Klimaprüfzelle Typ: 3707/04, Feutron Klimasimulation GmbH, Langenwetzendorf), in der unterschiedliche Umgebungsparameter variiert wurden (s.u.). Die Niederschlagssimulation erfolgte in einer eigens dafür konzipierten und gebauten Regenkammer (vgl. Absch. Simulierte Beregnung). Die Analyse der Besiedlung wurde mit Hilfe eines modifizierten Fluoreszenzmikroskops (Absch. Messung des Algenbewuchses über die Fluoreszenzintensität) durchgeführt.

Die Untersuchung wurde zweimal wiederholt. Diese Durchläufe unterschieden sich in verschiedenen Parametern (vgl. Tab 6.3). Im Folgenden werden die zwei Versuchsdurchläufe als NA I und NA II bezeichnet.

Tab. 6.3: Versuchsbedingungen der beiden Durchläufe NA I und NA II

	NA I	NA II
Versuchsdauer	10 Wochen	12 Wochen
Inokulationsmenge	50 ml pro Woche	2x 30 ml pro Woche
Zellzahl/mL	2,5 Mio.	5 Mio.
Temperatur (Klimakammer)	20°C	15° C
rel. Luftfeuchte (Klimakammer)	70%	70%
Beleuchtung	12 Hell/Dunkel	12 Hell/Dunkel
PAR (photosynthetisch aktive Strahlung)*	40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Lichtintensität*	4.000 Lux	1.300 Lux
UV-Strahlung*	10 $\mu\text{W/cm}^2$	200 $\mu\text{W/cm}^2$

* gemessen in Kunststoffboxen (s. Kap. Lagerung der Prüfkörper in der Klimakammer)

Lagerung der Prüfkörper in der Klimakammer

Die Prüfkörper wurden in transparenten, UV-durchlässigen, abgedichteten Kunststoffboxen (Curver Aufbewahrungsbox [Toy Box], 29L, Curver Germany GmbH, Neu Isenburg) aufbewahrt und transportiert (Abb. 6.3). Die geschlossenen Boxen erhöhten die rel. Luftfeuchte auf 100% und dienten damit zur Optimierung der

Wachstumsbedingungen. Sie verhinderten zugleich unerwünschte Fremdkontaminationen der Prüfkörper.

In den Boxen waren die Probenkörper in einem Winkel von 60° aufgestellt. Am Boden jeder Box befand sich eine Schicht des hochporösen Substrats Perlite (Perligran G, Knauf Perlite GmbH, Dortmund), von dem die Probenkörper durch einen Gitterboden getrennt waren. Das Perlite diente als Wasserspeicher und bewirkte eine konstant hohe Luftfeuchte. Nach Testmessungen mit einem Aspirationspsychrometer betrug die relative Feuchte in den Boxen bereits 15 Minuten nach Schließung des Deckels wieder 100%.

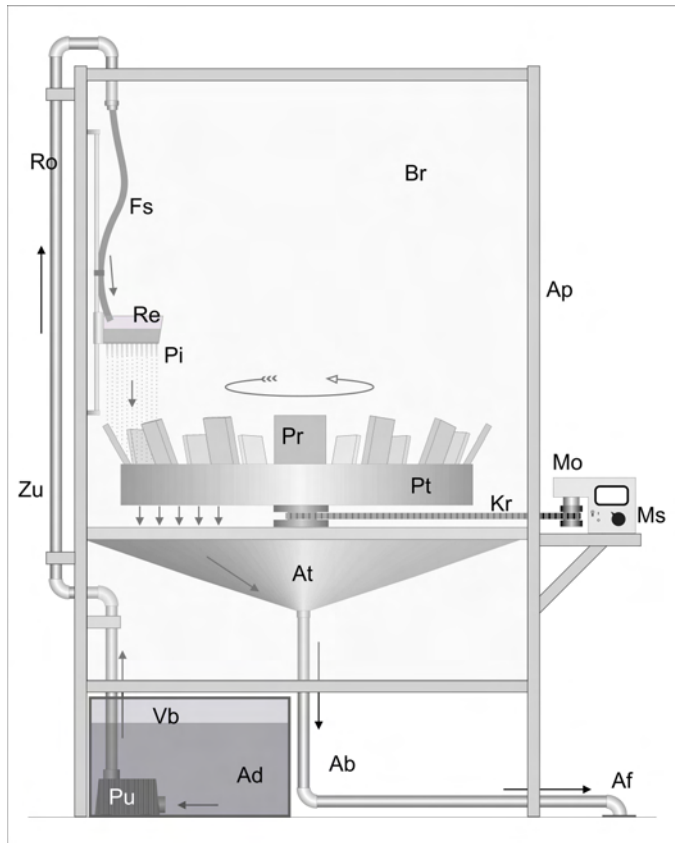


Abb. 6.3: Aufbewahrungsbox mit Fassadenprüfkörpern

In der Klimakammer wurden je nach Versuch verschiedene Parameter variiert, einen Überblick hierüber gibt Tab. 6.3. Die Angaben zu Lichtstärke, photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) und UV-Strahlung beziehen sich auf Messungen, die in den Boxen, d.h. nach Transmission des Lichts durch den Kunststoff, durchgeführt wurden.

Simulierte Beregnung

Superhydrophobe selbstreinigende Oberflächen benötigen für den Reinigungsprozess bewegtes Wasser (Kap. 3.1). Für die Versuche wurde deshalb eigens eine Beregnungskammer hergestellt, mit deren Hilfe eine automatisierte simulierte Beregnung der Proben möglich war (Abb. 6.4). Die Probenkörper wurden, auf einem Drehteller befindend, mit einer konstanten Geschwindigkeit an einer Stelle vorbeigeführt, an der die simulierte Beregnung stattfand.



Ad	Aqua demin.
Ab	Wasserablauf
Af	Abfluss
Ap	Aluminiumprofile
At	Ablauftrichter
Br	Beregnungskammer
Fs	Flexibler Schlauch
Kr	Keilriemen
Mo	Motor
Ms	Motorsteuerung
Pi	Pipettenspitzen
Pt	Probenteller (drehbar)
Pr	Proben (60°)
Pu	Wasserpumpe
Re	Regenbehälter
Ro	Rohrleitung
Vb	Vorratsbehälter (Aqua demin)
Zu	Wasserzuleitung

Abb. 6.4: Schematischer Aufbau der Beregnungskammer. Schwarze Pfeile deuten den Weg des Wassers bei Beregnung an

Die Regenkammer wurde aus Aluminiumprofilen und PVC-Platten selbst gebaut. In ihr konnten bis zu 12 Prüfkörper gleichzeitig mit Aqua demin. beregnet werden. Die Prüfkörper wurden auf einem großen, perforierten Drehteller (\varnothing 60cm) im Winkel von 60° am Rand aufgestellt. Der Drehteller wurde von einem außerhalb der Kammer befindlichen Motor angetrieben.

Für den Beregnungsvorgang wurde über eine Pumpe das demineralisierte Wasser aus einem Vorratsbehälter in ein höhenverstellbares Beregnungsgefäß gepumpt. Das Beregnungsgefäß bestand aus einer stabilen Kunststoffbox, in deren Boden Pipettenspitzen eingefügt wurden. Insgesamt wurden in 49 (7x7) vorgebohrten Löchern 100 μ l Standardtips (Eppendorf, Hamburg) mit Heißkleber am Boden der Box wasserdicht verklebt.

Bei der simulierten Beregnung wurde ein Abstand von 25 cm zwischen Probenoberkante und Wasserlinie im Gießgefäß eingestellt. Die Anzahl der Umdrehungen wurde so eingestellt, dass auf jeden Prüfkörper bei jeder Beregnung ca. 25 ml demineralisiertes Wasser fielen.

Inokulation der Prüfkörper

Um die natürliche Deposition der Algen über Regen zu simulieren, wurden sie in Wasser suspendiert auf die Oberflächen aufgebracht (Nassinokulation).

Vor jeder Nassinokulation der Prüfkörper wurde die Zellkonzentration der Algensuspensionen mit einer Thoma-Zählkammer bestimmt und die Suspensionen nach Bedarf mit demineralisiertem Wasser verdünnt. Die Menge der Algensuspension betrug je nach Versuchsdurchlauf 50 ml (NA I) oder 2x30 ml (NA II) (s. Tab. 6.3).

Für die Inokulation wurden die Prüfkörper in eine Halterung im Winkel von 60° gestellt. Die Beregnung mit den Suspensionen erfolgte aus 30 cm Höhe (ab Unterkante des Prüfkörpers, Abb. 6.5). Der Suspensionsbehälter (60ml) war eine geradwandige Dose (NALGENE®, IDL aus PP, Labomedic, Bonn), in deren Boden fünf 100 μ l Standardtips (Eppendorf, Hamburg) wasserdicht mit Heißkleber verklebt wurden. Während des Inokulationsvorgangs wurden die Prüfkörper langsam und gleichmäßig hin und her bewegt, damit alle Stellen der Oberfläche benetzt wurden.

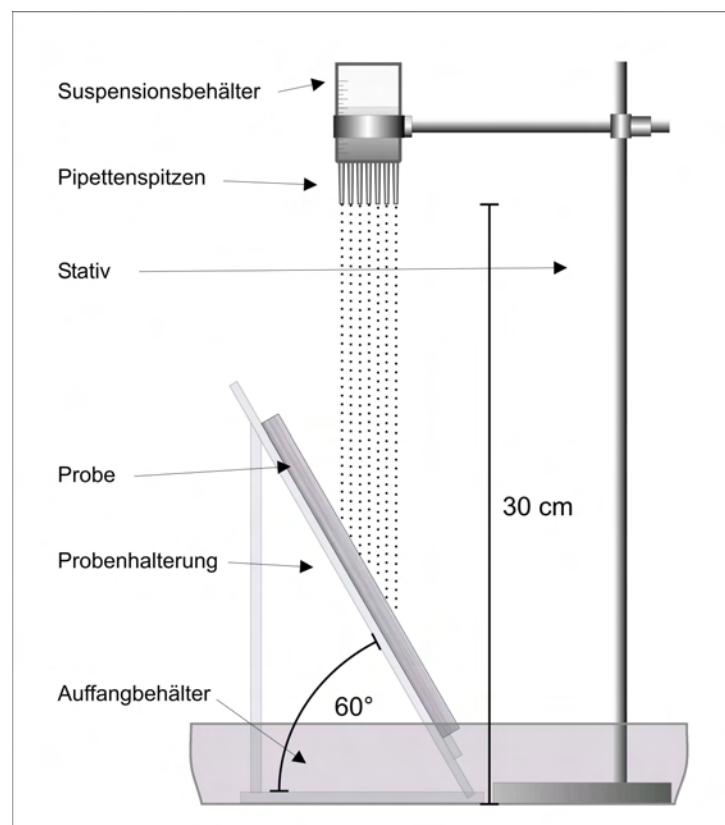


Abb. 6.5: Schematischer Aufbau der Nassinokulation von Prüfkörpern

Messung des Algenbewuchses über die Fluoreszenzintensität

Zur Beurteilung des Wachstums der Algen auf den Oberflächen wurde deren Autofluoreszenz detektiert. Diese Methode ermöglichte eine zerstörungsfreie Analyse des Bewuchses auf den Baustoffen. Hierfür wurde ein handelsübliches Fluoreszenzmikroskop (Carl Zeiss, Jena), ausgestattet mit einem Fluoreszenz-Auflichtkondensator des Typs IV FI, so modifiziert, dass über das Fluoreszenzsignal eine Aussage über die Algenmenge im Messbereich möglich war. Für die Messung der Chlorophyllfluoreszenz wurde folgender Filtersatz verwendet: Filtersatz 15 bestehend aus dem Erregerfilter BP 546/12, Farbteiler FT 580 und Sperrfilter LP 590 (Carl Zeiss, Jena). Als Objektiv wurde das Neofluar 6,3/0,20 (Carl Zeiss, Jena) verwendet.

Der Umbau beinhaltete die Ausstattung des Gerätes mit einem Lichtsensor, einer automatischen Messwerterfassung, einer Verstärkereinheit, einem Umschalter für Fokus- und Messlicht und einer Erweiterung der Auflagefläche für große Proben (Abb. 6.6).

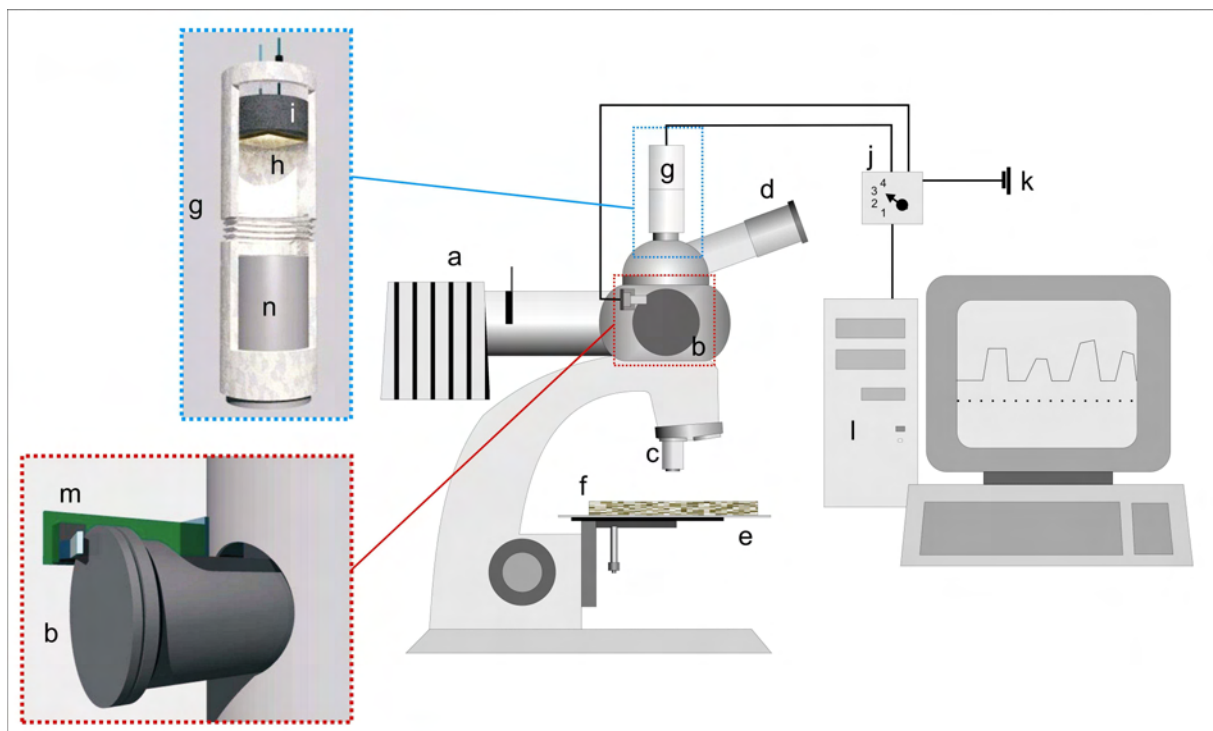


Abb. 6.6: Modifikationen am Fluoreszenzmikroskop zur Messung der Fluoreszenzintensität von Algen auf Baustoffoberflächen

- | | | |
|--------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| a: UV-Lampe | g: Sensoraufsatz an Kameraadapter | m: Schalter für Filterschublade |
| b: Filterschublade | h: Lichtsensor | n: Kameraadapter |
| c: Objektiv | i: Sensorhalterung aus Schaumstoff | |
| d: Okular | j: Verstärker | |
| e: Probentisch | k: Stromquelle | |
| f: Probe | l: Computer | |

Die vorhandene Objektträgerhalterung auf dem Objektstisch wurde für die Messungen vollständig abgebaut. Stattdessen wurde eine 15x25 cm² große Plexiglasscheibe mit doppelseitigem Klebeband aufgeklebt. Dieser Anbau ermöglichte die Ablage großer Prüfkörper.

Zur Erfassung der Chlorophyllfluoreszenz wurde am Tubus des Mikroskops im Strahlengang zum Kameraadapter ein Aluminiumaufsatz mit integrierter 10x10 mm² großer Fotodiode (Conrad Elektronik, Hirschau) angebaut. Dieser Aufsatz bestand aus zwei mit einem Gewinde verbundenen Aluminiumröhren, die eine stufenlose Abstandsregelung der Fotodiode ermöglichten (Abb. 6.6). Der Aufbau erlaubte eine genaue Justierung der Fotodiode in der Abbildungsebene. Die mit einem Verstärker verbundene Fotodiode wurde im Inneren in einen Schaumstoff eingelassen, durch den diese gehalten und ihre Anschlüsse nach draußen geführt wurden (s. Abb. 6.6, Vergrößerung). Der linear arbeitende Präzisions-Operationsverstärker besaß vier Empfindlichkeitsstufen, mit denen die Fluoreszenzintensität erfasst wurde. Bei der größten Verstärkungsstufe (Messwiderstand 10⁸ Ω) konnte noch ein Fotodioden-Strom von 10⁻¹¹A gemessen werden. Diese hohe Empfindlichkeit ermöglichte sogar Messungen von einzelnen fluoreszierenden Algen auf den Oberflächen. Die Datenerfassung erfolgte über einen Multimeter (M-3610D, Voltcraft) mit serieller Schnittstelle. Mit Hilfe der dazugehörigen Software „DMM-Digiscope“ (Conrad Elektronik, Hirschau) wurden die Messwerte mit einer Rate von 3 Messungen pro Sekunde in einen Computer übertragen. Die Datenreihen wurden mit Excel (Microsoft) als Tabellen oder Diagramme ausgewertet.

Eine wichtige Modifikation am Fluoreszenzmikroskop war der Anbau eines Schalters für Fokussier- und Anregungslicht (Messlicht). Die am Fluoreszenzmikroskop vorhandene Filterschublade bestand aus zwei Filtersteckplätzen, zwischen denen ohne aufwändigen Ausbau ein Wechsel der Filtersätze möglich war. Ein Filtersatz diente zum Fokussieren auf der Oberfläche (Fokuslicht), während der zweite Filtersatz für die Fluoreszenzmessung (Messlicht) verwendet wurde. Für das Fokuslicht wurde ein Filtersatz verwendet, der schwaches oranges Licht erzeugte. Das Umschalten zwischen Fokus- und Messlicht erfolgte durch das Einschoben der Filtersätze, wodurch entweder die Messung gestartet oder beendet wurde. Dies erfolgte über einen außen angebrachten Schalter, der in der Messlicht-Stellung kontaktiert wurde (s. Abb. 6.6) und damit die Datenerfassung startete.

Da die Intensitätsmessung der Chlorophyllfluoreszenz nur punktuell erfolgen konnte (die Größe der gemessenen Fläche pro Einzelmessung betrug mit dem Objektiv Neofluar 6,3/0,20 ca. 2 mm²), mussten viele Stellen eines Prüfkörpers gemessen werden, um eine Aussage über den Flächenbewuchs mit Algen treffen zu können. Damit nach mehreren Versuchswochen garantiert werden konnte, dass stets die gleichen Stellen bei einem Prüfkörper gemessen werden, wurden zwei Schablonen, eine für Dachziegel (8x15 cm) mit 24 Messfeldern (4x6) und eine für Fassaden und Filterpapier (10x15 cm) mit 32 Messfenstern (4x8) verwendet. Die Messfenster (Ø ca. 2,3 mm) wurden mit einem Lochstanzer gefertigt. Eine Schablone bestand aus einer handelsüblichen schwarzen PVC Teichfolie (Knauber GmbH, Bonn), die bei dem verwendeten Anregungslicht selbst nicht fluoreszierte.

Alle Prüfkörper wurden vor einer Messung für 30 Minuten im Dunkeln aufbewahrt, um zu gewährleisten, dass die Messungen an dunkeladaptierten Algen (inaktive Photosynthese) durchgeführt wurden. Jeder Prüfkörper wurde in einer Ecke an der Seite mit einer Markierung versehen. Diese Stelle entsprach der linken oberen Ecke des Prüfkörpers, an der jeweils die Messung gestartet wurde. Auf den Prüfkörper wurde die Schablone gelegt, an deren Kanten eckige Halterungen aus Kunststoff mittels Heißkleber angebracht waren, die eine präzise Arretierung an den Proben gewährleisten (Abb. 6.7).

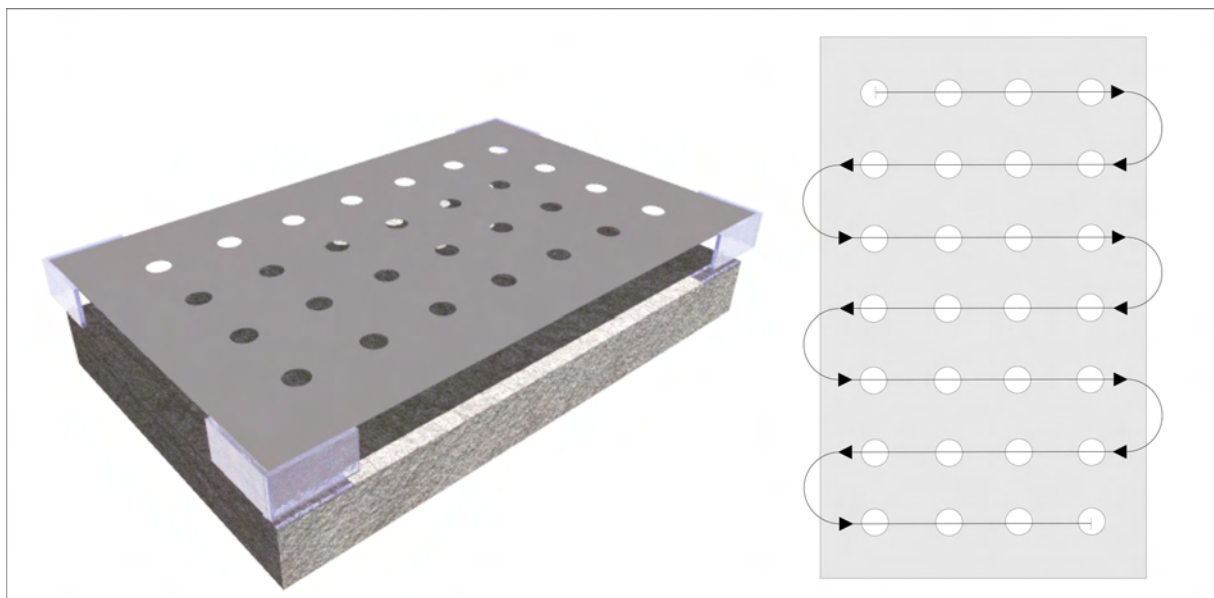


Abb. 6.7: Schematische Darstellung des Aufbaus der Messschablone (links) und die alternierende Messstrecke auf der Schablone während der Fluoreszenzerfassung (rechts)

Die Messung der Fluoreszenzintensität begann jeweils in der linken oberen Ecke und verlief alternierend über die Probe wie in Abb. 6.7 dargestellt. Vor dem Start der Messung wurde im Fokuslicht der Brennpunkt auf der Probenoberfläche scharf gestellt. Beim Wechsel zwischen den Fenstern wurde jeweils das Messlicht ausgeschaltet und unter Fokuslicht erst nach exakter Positionierung im nächsten Fenster wieder eingeschaltet. Durch diese Messunterbrechungen und die exakt festgelegte Messfensterabfolge konnten bei Bedarf später alle Fluoreszenzintensitäten einem Ort auf der Probe zugeordnet werden. Die Abb. 6.8 zeigt exemplarisch, dass entsprechende Flächenplots der Fluoreszenzintensitäten sehr gut die Algenbelegung widerspiegeln. Über die Einzelmesswerte einer Probe wurde gemittelt und dieser Wert als Fluoreszenzintensität der gesamten Probe angenommen. Die Ergebnisse wurden mit dem Programm Excel (Microsoft) ausgewertet und bearbeitet.

Im Ergebnisteil werden ausschließlich die Veränderungen der Fluoreszenz über den Gesamtversuchszeitraum dargestellt, da die wöchentlichen Änderungen nur sehr gering ausfielen.

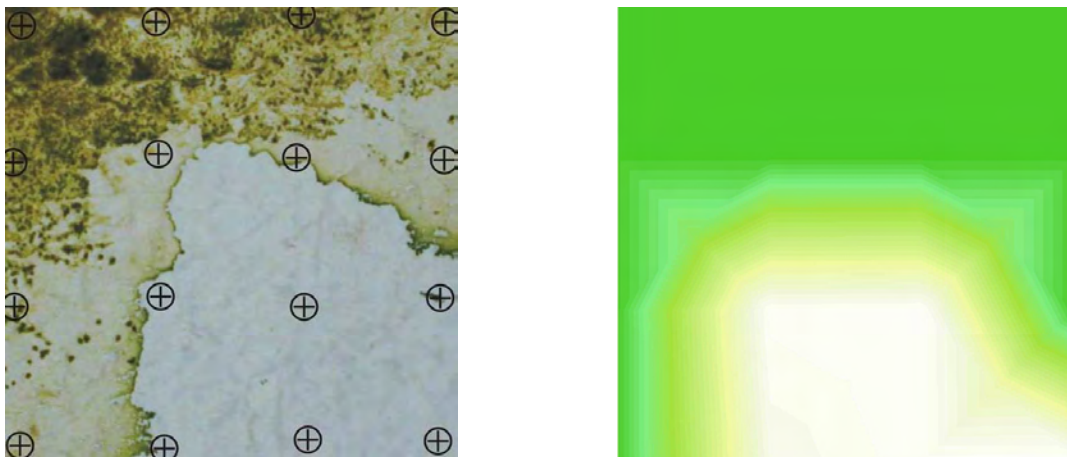


Abb. 6.8: Grafische Darstellung von Fluoreszenzdaten. Links: Probenkörper mit Algenbelegung und projizierten Messpunkten (Kreise mit Kreuzen). Rechts: Flächenplot der ermittelten Chlorophyllfluoreszenzintensität (hell: geringe Fluoreszenz, dunkel grün: stärkere Fluoreszenz)

Da jede Probe, auch ohne Algen, fluoreszieren konnte, wurde von allen Proben die Grundfluoreszenz („Materialfluoreszenz“) vor dem Beginn der Untersuchung erfasst. Während der Untersuchung konnte sich diese Fluoreszenz, beispielsweise durch Auswaschen von Inhaltsstoffen, ändern. Deshalb wurde auch die Fluoreszenz der Kontrollen erfasst und die Werte der Materialfluoreszenz nach Versuchende von den Chlorophyllfluoreszenzdaten abgezogen. Auf diese Weise erhielt man die Fluoreszenzintensitäten, die ausschließlich auf die Algen zurückgeführt werden konnten.

6.6 Ergebnisse

Kontaktwinkel

Einige Oberflächen waren stark benetzbar, so dass eine vollständige Spreitung der Tropfen beobachtet werden konnte. Eine Kontaktwinkelmessung war in diesen Fällen nicht möglich. Die Ergebnisse sind in der Datentabelle durch ein * gekennzeichnet.

Aus dem gleichen Grund konnte der Kontaktwinkel der Wachstumskontrolle „Filterpapier“ nicht bestimmt werden. Hier lag eine poröse Oberfläche vor, in die der Tropfen sofort eingesogen wurde.

Tab. 6.4: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung bei Fassadenfarben (n = 11, FW: n = 12)

Bezeichnung	Kontaktwinkel	Standardabweichung
FW	115,0°	± 9,2°
FV	133,1°	± 4,8°
FU	134,3°	± 1,3°
FT	139,8°	± 2,4°

Alle gemessenen KWs der Fassadenfarben betragen deutlich über 90° (Tab. 6.4). Bis auf die Probe FW lagen die KWs aller Fassadenfarben im Bereich zwischen 130°-140°. Die stärkste Streuung zeigte ebenfalls die Probe FW.

Tab. 6.5: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung bei Dachziegeln (n = 10)

Bezeichnung	Kontaktwinkel	Standardabweichung
DE	44,3°	± 4,2°
DA	*	*
DL	144,2°	± 0,4°

Im Gegensatz zu den Fassadenfarben waren die KWs der Dachziegelprüfkörper sehr unterschiedlich (Tab. 6.5). Bei dem Dachziegel DA lag eine vollständige Spreitung der Tropfen vor, während beim Prüfkörper DE ein niedriger KW gemessen wurde. Bei dem Dachziegel DL wurde ein KW deutlich über 140° gemessen.

Ergebnisse der Nassinokulation I (NA I)

Fassadenfarben (Abb. 6.9)

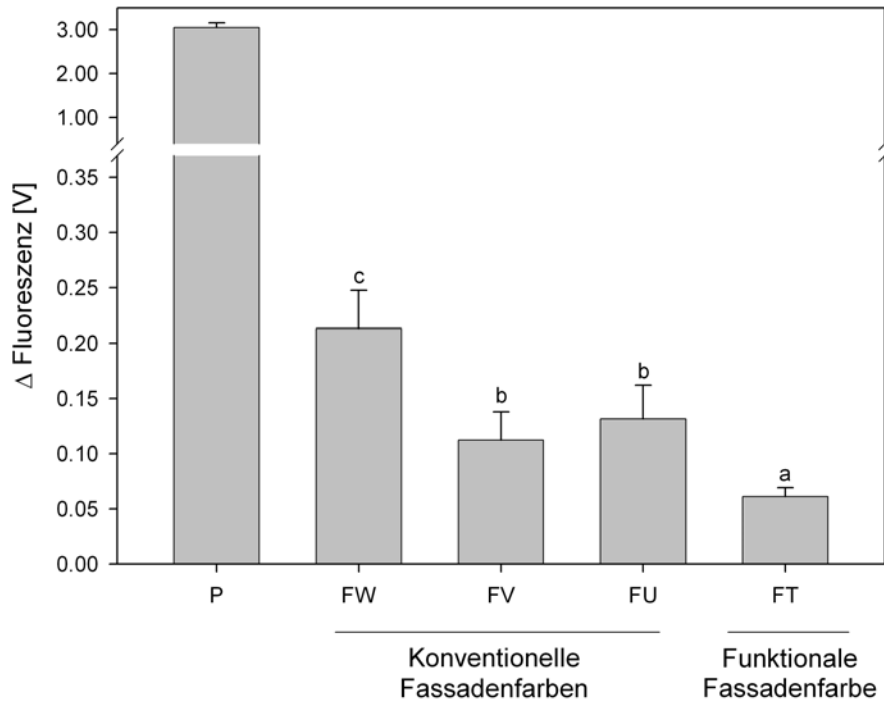


Abb. 6.9: Fluoreszenzänderung [ΔV] vier verschiedener Fassadenfarben sowie der Referenz (P) über 10 Wochen Versuchsdauer. Mittelwerte aus fünf Parallelen mit einfacher Standardabweichung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$). Abkürzungen siehe Tab. 6.2.

Nach 10 Wochen war eine Unterscheidung in der Algenbelegung zwischen den konventionellen und der funktionalen Fassadenfarbe möglich. Bei der Farbe FT war die Zunahme der Fluoreszenz signifikant niedriger als bei den drei konventionellen Farben. Die höchste Fluoreszenzintensität wurde auf der Fassadenfarbe FW gemessen. Generell fiel die Besiedlung auf allen Fassadenfarben deutlich geringer als auf dem Filterpapier aus.

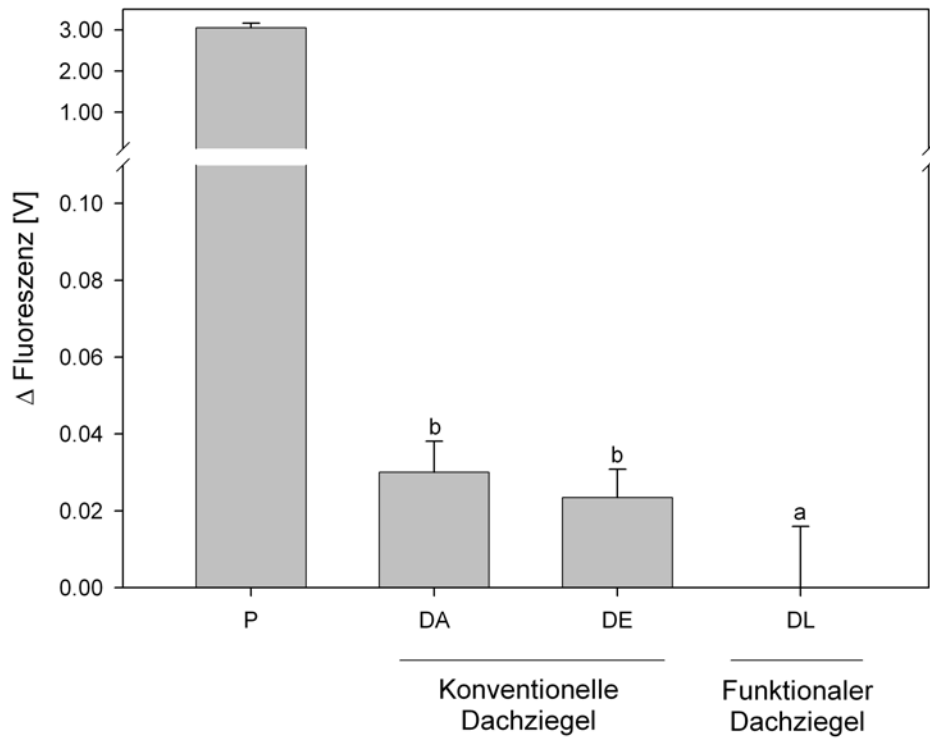
Dachziegel (Abb. 6.10)

Abb. 6.10: Fluoreszenzänderung [ΔV] drei verschiedener Dachziegel sowie der Referenz (P) über 10 Wochen Versuchsdauer. Mittelwerte aus fünf Parallelen mit einfacher Standardabweichung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$). Abkürzungen siehe Tab. 6.2.

Im Vergleich zur Referenz P waren auf allen Dachziegeln deutlich weniger Algen zu finden. Bei dem funktionalen Dachziegel DL wurde über die Dauer des Experiments überhaupt keine Algenbesiedlung nachgewiesen. Auf den übrigen zwei konventionellen Dachziegeln lag zwar eine geringe aber signifikant höhere Besiedlung vor.

Ergebnisse der Nassinokulation II (NA II)

Fassadenfarben (Abb. 6.11)

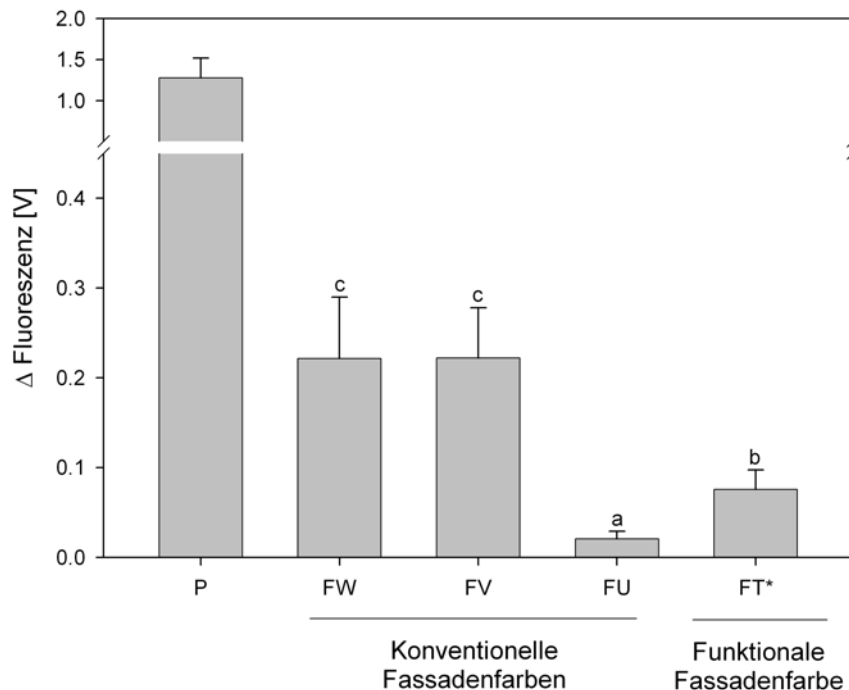


Abb. 6.11: Fluoreszenzänderung [ΔV] vier verschiedener Fassadenfarben sowie der Referenz (P) über 12 Wochen Versuchsdauer. Mittelwerte aus fünf Parallelen mit einfacher Standardabweichung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$). Abkürzungen siehe Tab. 6.2. FT* ist eine leicht modifizierte, jedoch chemisch und strukturell zu Lotusan® identische Fassadenfarbe (persönliche Kommunikation mit STO AG)

In Abb. 6.11 ist zu sehen, dass nach 12 Wochen bei den veränderten Versuchsbedingungen auf der Referenz deutlich weniger Algen als im ersten Versuchsdurchlauf vorhanden waren, obwohl die Algenbelastung erhöht wurde. Die konventionellen Fassadenfarben FW und FV wiesen gegenüber allen anderen Oberflächen, eine signifikant höhere Fluoreszenz auf. Bei FT* wurde eine deutlich geringere Fluoreszenzintensität gemessen, jedoch signifikant mehr als auf der Fassadenfarbe FU. Diese wies die geringste Zunahme an Algen auf.

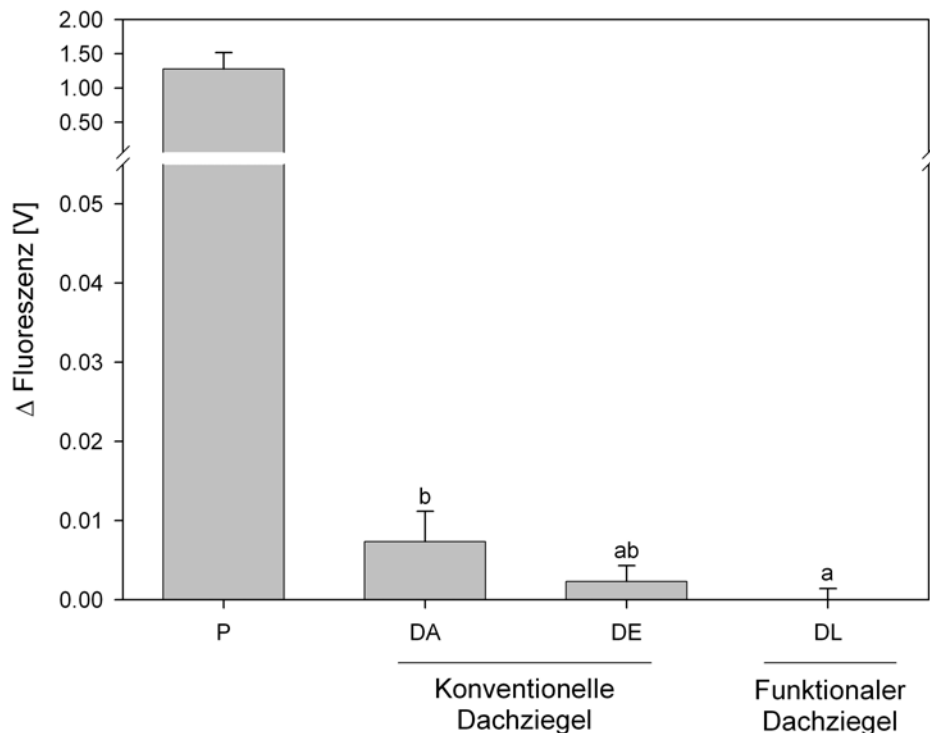
Dachziegel (Abb. 6.12)

Abb. 6.12: Fluoreszenzänderung [ΔV] drei verschiedener Dachziegel sowie der Referenz (P) über 12 Wochen Versuchsdauer. Mittelwerte aus fünf Parallelen mit einfacher Standardabweichung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$). Abkürzungen siehe Tab. 6.2.

Bei den Dachziegeln (Abb. 6.12) war die Algenbesiedlung, ähnlich wie bereits bei den Fassadenfarben, trotz erhöhten Besiedlungsdruckes insgesamt niedriger als im ersten Versuchsdurchlauf (vgl. Abb. 6.10). Ein eindeutiger Unterschied in der Algenbelegung zwischen konventionellen und dem funktionalen Dachziegeln war nicht möglich. Niedrige Fluoreszenzwerte wurden sowohl bei dem konventionellen Prüfkörper DE wie auch dem funktionalen Prüfkörper DL gemessen. Leicht höhere Fluoreszenzwerte wurden bei dem Dachziegel DA ermittelt. Ein signifikanter Unterschied zwischen DE und DL und DE und DA bestand aber nicht.

6.7 Diskussion

Da es wenig sinnvoll erscheint, das Benetzungsverhalten und die Besiedlungsneigung der zwei untersuchten Baustoffe Fassadenfarben und Dachziegel miteinander zu vergleichen, werden im Folgenden die Ergebnisse für Fassadenfarben und Dachziegel getrennt diskutiert.

Benetzung der Fassadenfarben

Die untersuchten konventionellen und funktionalen Fassadenfarben unterschieden sich in ihrer Benetzbarkeit verhältnismäßig wenig. Alle besaßen Kontaktwinkel deutlich über 100° und können somit als hydrophob bezeichnet werden. Besonders hoher KW wurde bei der Fassadenfarbe FT gemessen, wenn auch das Kriterium der Superhydrophobie von 140° knapp verfehlt wurde. Trotzdem konnte während der Beregnung ein fast vollständiges Abfließen von Wassertropfen bei dieser Farbe beobachtet werden. Das kein Kontaktwinkel größer 140° erzielt wurde, ist wahrscheinlich dadurch bedingt, dass die Fassadenfarben zuvor nicht konditioniert wurde. Die Fassadenfarbe Lotusan® besitzt zu Beginn einen KW von ca. 140° , der im Laufe der Zeit auf ca. 145° ansteigt (Born & Ermuth, 1999; Born *et al.*, 2000). Dies ist dadurch zu erklären, dass in der Farbe enthaltene Emulgatoren erst durch den Trocknungsprozess und die Bewitterung (UV-Strahlung und Regenbelastung) umgewandelt oder ausgewaschen werden. Übrig bleibt das eigentlich hydrophobe Gerüst der Silikonharze (Gysau & Franke, 2001).

Bei den übrigen Fassadenfarben wurden ebenfalls sehr hohe Kontaktwinkel ermittelt. Da auf diesen Oberflächen Wassertropfen jedoch nicht sofort abfließen sind, kann davon ausgegangen werden, dass hier das Wenzel-Benetzungsstadium (Lafuma & Quéré, 2003) vorlag: Die Rauigkeit der Oberfläche verstärkte ihre Hydrophobie und führte zu den hohen Kontaktwinkeln (vgl. Kap. 3).

Wachstum von Algen auf Fassadenfarben

Versuchsdurchlauf NA I:

Generell konnte mit Ausnahme der Referenz Filterpapier nach 10 Wochen kein deutlich sichtbarer Algenbewuchs bei den Fassadenfarben ausgemacht werden. Selbst unter den sehr günstigen Wachstumsbedingungen und bei der häufigen Benetzung der Oberflächen wurde nur wenig Algenwachstum ausgemacht. Die Chlorophyllkonzentrationen lagen unter $5 \text{ mg chl a m}^{-2}$ (vgl. Schumann *et al.*, 2004), so dass eine Vergrünung der Oberflächen nicht beobachtet werden konnte. Dennoch

waren Algen auf den Oberflächen vorhanden, wie die Untersuchungen der Chlorophyllfluoreszenz ergaben.

Obwohl die Unterschiede in der Benetzbarkeit bei den Fassadenfarben eher gering ausfielen, konnten deutliche Differenzen in der Besiedlungsneigung der Oberflächen festgestellt werden. Besonders wenig Chlorophyllfluoreszenz wurde auf der selbstreinigenden Fassadenfarbe FT festgestellt. In diesem Fall könnte die extreme Hydrophobie eine Etablierung der Algen auf der Oberfläche verhindert haben (Hladik, 2003). Bei der Nassinokulation wurden aufgrund des Abperlens der Tropfen kaum Algen auf den Oberflächen abgelegt. Die wenigen Algen, die dennoch auf den Oberflächen verblieben, wurden wahrscheinlich bei der Regensimulation von den selbstreinigenden Oberflächen abgewaschen, wie von Born *et al.* (2000) für diese Fassadenfarbe erwartet. Dies bestätigt die Annahme, dass funktionale Oberflächen eine Alternative zu biozidausgerüsteten Oberflächen darstellen könnten (Büchli & Raschle, 2004; Nay & Raschle, 2004). Eine von (Born & Abdou, 2003) durchgeführte Freilanduntersuchung bestätigt das hier erzielte Ergebnis. In ihrem Fall wurden weniger Algen an superhydrophoben, selbstreinigenden Oberflächen im Vergleich zu anderen konventionellen Fassadenfarben gefunden.

Andere Freilanduntersuchungen widerlegen jedoch, dass selbstreinigende Fassadenfarben weniger Algenbefall aufweisen als konventionelle Fassadenfarben (bsp. (Fitz *et al.*, 2006). Eine Ursache für das erhöhte Aufkommen von Algen an selbstreinigenden Fassadenfarben wird in der Kondensation gesehen (Künzel & Sedlbauer, 2001). Unter Kondensationsbedingungen wurden lange Perioden hoher Oberflächenfeuchte auf stark hydrophoben Fassadenfarben nachgewiesen (Künzel *et al.*, 2002). Das Vorhandensein von tropfbarem Wasser begünstigt in diesem Fall das Wachstum von Algen (Blaich, 1999; Halter, 1997).

Ein Zusammenhang zwischen Benetzung und Algenetablierung konnte auch bei den übrigen konventionellen Fassadenfarben beobachtet werden. Die Fassadenfarben mit Kontaktwinkeln um die 130° (FV u. FU) wiesen weniger Fluoreszenz auf als die Fassadenfarbe FW, die mit 115° am stärksten benetzbar war.

Versuchsdurchlauf NA II:

Auch in diesem Versuchsdurchlauf konnte bis auf das Filterpapier auf keiner der Oberflächen nach den 12 Wochen ein flächiger sichtbarer Algenbewuchs ausgemacht werden. Das bedeutet, dass die Chlorophyllkonzentration wie bereits beim

Versuchsdurchlauf NA I unter $5 \text{ mg chl a m}^{-2}$ gelegen haben muss (Schumann *et al.*, 2004). Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Benetzung und Etablierung von Algen auf den Oberflächen bestand in diesem Versuchsdurchlauf nicht. Die drei unterschiedlich stark benetzbaren Farben FW, FV und FT* wiesen alle eine fast gleich hohe Algenbelegung auf, wohingegen auf der Fassadenfarbe FU kaum Algenbewuchs nachgewiesen werden konnte. Dieser fiel ähnlich gering aus wie bei der selbstreinigenden Farbe FT*, die einen deutlich höheren KW besaß.

Bei der funktionalen Fassadenfarben FT* wurde nur eine geringe Chlorophyllfluoreszenz-Intensität gemessen. Dieses Ergebnis bestätigt die Wirksamkeit der Unbenetzbarkeit und der Selbstreinigung als Schutz gegenüber Algen (Born & Abdou, 2003; Born *et al.*, 2000) und die These, dass eine geringe Benetzung auch zu einem geringeren Bewuchs führt (Papen *et al.*, 1994).

Überraschend war das Ergebnis bei der Farbe FU. Ein möglicher Grund für die geringe Fluoreszenz auf dieser Oberfläche könnte die in diesem Versuchsdurchlauf stark erhöhte UV-Strahlung sein. Möglicherweise bewirkte diese eine Veränderung der Oberflächenchemie, die sich direkt auf die Algenbesiedlung ausgewirkt hat. Eine endgültige Klärung der Ursache des geringen Bewuchses auf dieser Oberfläche ist nicht gelungen.

Benetzung der Dachziegel

Die im Test befindlichen herkömmlichen und der unbenetzbare Tondachziegel unterschieden sich erwartungsgemäß stark in ihren Benetzungseigenschaften.

Der superhydrophobe, selbstreinigende Dachziegel wies einen sehr hohen KW auf. Über die erfolgreiche Übertragung der Superhydrophobie auf Dachziegel wurde bereits Ende 2000 berichtet (Barthlott & Neinhuis, 2001). Ihre Anwendung bei Dächern wurde bereits länger diskutiert, da ähnlich wie bei den Fassadenfarben Probleme auftreten, die mit unbenetzbaren Oberflächen gelöst werden könnten (bsp. Møller, 2002b). Die Anwendung selbstreinigender Dachziegel ist jedoch umstritten (Gould, 2003). Der Autor vertritt die Ansicht, dass Dächer auch verschmutzen und vergrünen dürfen, da er darin keine Funktionsbeeinträchtigung erkennen kann. Dass jedoch auch über den Schutz vor MO nachgedacht werden muss, zeigen Untersuchungen die belegen, dass Mikroorganismen auch mineralische Untergründe schädigen können (Eckhardt, 1991; Sand & Bock, 1990, 1991; Warscheid, 1996).

Bis auf den Dachziegel DL waren alle übrigen Dachziegel hydrophil. Nur bei dem Dachziegel DE konnte noch ein geringer Kontaktwinkel erfasst werden. Bei dem Dachziegel DA wurde kein Gleichgewichtskontaktwinkel erreicht, da die Tropfen spreiteten eingesogen wurden. Wegen dieses Sorptionsverhaltens werden bei Dachziegeln üblicherweise nicht die Kontaktwinkel, sondern die Wasseraufnahme pro Zeit gemessen. Für Tondachziegel werden dabei hohe Werte von $2,8 \text{ Kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ erreicht (Zimmermann, 2006).

Wachstum von Algen auf Dachziegeln

Versuchsdurchlauf NA I:

Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Benetzbarkeit und Algenwachstum konnte in diesem Experiment für den selbstreinigenden, superhydrophoben Dachziegel (DL) festgestellt werden. Wie erwartet wurden auf dieser Oberfläche nahezu keine Algen abgelegt oder konnten anwachsen. Die Oberflächen waren während der gesamten Versuchsdauer trotz Beregnung und Inokulation nahezu vollständig trocken. Eine solche Oberfläche stellt deshalb einen guten Schutz gegenüber dem Wachstum von Algen dar und ist in ihrer Funktion mit den biologischen Vorbildern vergleichbar (Barthlott & Neinhuis, 1997).

Auf den Dachziegeln DE und DA konnte jeweils ein ähnlich starker Bewuchs festgestellt werden. Im Vergleich zu den extremen Unterschieden in der Benetzbarkeit zwischen dem superhydrophoben und den übrigen Dachziegeln fielen die Differenzen der Intensitäten auf allen Oberflächen verhältnismäßig gering aus. Als Ursache kommen die saugenden Eigenschaften der Dachziegel in Betracht (Zimmermann, 2006). Oberflächliches Wasser stünde trotz der guten Benetzbarkeit den Algen auch in diesem Fall nicht zur Verfügung. So könnte sich ein Unterschied im Bewuchs vielleicht erst nach noch längeren Zeiträumen einstellen (Künzel, 2000). Ebenso kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Ziegeloberfläche generell ein schwer zu besiedelndes Substrat darstellt. Dies könnte mit weiteren Einflussparametern wie beispielsweise dem pH-Wert oder allgemein mit der chemischen Kompatibilität zusammenhängen. Tiano (1998) haben jedoch für Steinbesiedelnde Algen gezeigt, dass die Umgebungsparameter und die physikalische Charakteristik der Oberfläche eine bedeutendere Rolle bei der Besiedlung spielen als der Chemismus der Oberfläche.

Versuchsdurchlauf NA II:

Im zweiten Versuchsdurchlauf NA II wurde ein ähnliches Ergebnis erzielt. Ein Unterschied bestand lediglich darin, dass obwohl mit deutlich höheren Algenkonzentrationen inokuliert wurde, auf allen Oberflächen weniger Chlorophyllfluoreszenz detektiert wurde. Erneut fanden sich auf der Oberfläche von DL nahezu keine Algen. Gegenüber der Probe DE war in diesem Fall das Ergebnis jedoch nicht signifikant. Auf der Probe DA wurden deutlich mehr Algen ausgemacht. Die Proben DA und DE unterschieden sich wiederum nicht voneinander.

Als Ursache für das geringe Wachstum kommt erneut die Benetzbarkeit in Betracht. Sowohl die Unbenetzbarkeit (Barthlott & Neinhuis, 1997), wie auch die saugenden Eigenschaften (Zimmermann, 2006) reduzierten das für das Wachstum notwendige Oberflächenwasser. Die etwas stärkere Besiedlung der Probe DA könnte generell auf die höhere Rauigkeit des Dachziegels zurückgeführt werden (Bildtafeln 17 & 18). Eine Ansammlung von Algen in den zahlreichen Mikrokavitäten ist wahrscheinlich und für Sandstein bereits beschrieben worden (Young & Urquhart, 1996).

Das generell geringe Wachstum der Algen auf den Dachziegeln hätte auch darauf zurückgeführt werden, dass die im Versuch verwendeten Algen nicht zu den relevanten Erstbesiedlern gehören, die bei Dachbaustoffen typischerweise auftreten. Jedoch zeigten Untersuchungen von Karsten et al. (2005)), dass durchaus einige der eingesetzten Algen auch auf Dächern vorkommen. Im Experiment nicht mit berücksichtigt wurde jedoch die Rolle der Sukzession. Unter natürlichen Bedingungen kann die zeitliche Abfolge der Mikroorganismen bei der Besiedlung eine zentrale Rolle spielen (Cadotte et al., 2005; Raschle, 2000).

Die insgesamt um die Hälfte geringeren Chlorophyllfluoreszenzintensitäten im Vergleich zum ersten Versuchsdurchlauf können wahrscheinlich auf die höhere UV-Intensität zurückgeführt werden. Diese war fast 20x höher als im ersten Durchlauf. Damit reduzierte die UV-Strahlung generell die Besiedlung der Oberflächen, wie mit der Referenz Filterpapier belegt werden konnte. Typische Strahlungsintensitäten in Deutschland (Steinmetz, 2000) liegen jedoch noch deutlich höher, wodurch eine Besiedlung von Dachbaustoffen noch weiter erschwert wird.

Erfassung der Chlorophyllfluoreszenz

Die Erfassung der Chlorophyllfluoreszenzintensität mit Hilfe des umgebauten Fluoreszenzmikroskops war nur punktuell möglich. Mit der Wahl einer möglichst

großen Anzahl an Messfenstern wurde zwar eine repräsentative Darstellung der Besiedlung möglich (s. Abb. 6.8), jedoch galt dies nur, wenn keine lokalen Intensitätsextrema vorhanden waren. Punktuelle Aufkonzentrationen der Algen, beispielsweise in angetrockneten Inokulationstropfen, wurden nicht mit erfasst, wenn diese sich nicht innerhalb des Messfensters befanden. Makroskopisch konnten in einigen wenigen Fällen solche lokalen Aufkonzentrationen festgestellt werden, die sich jedoch nicht in den Werten wieder finden ließen.

Ein weiteres Problem bestand in der Quantenausbeute der Chlorophyllfluoreszenz, die sich mit der Vitalität der Algen ändern kann. Zwar wurden alle Proben stets gleich behandelt, um die Bedingungen für die Algen stabil zu halten, Vitalitätsunterschiede, die auf die Biokompatibilität der Materialoberflächen zurückzuführen sind, können dennoch nicht ausgeschlossen werden.

Beide Probleme könnten mit Hilfe eines Puls-Amplituden-Fluorimeter (PAM) (Ounis *et al.*, 2001; Schreiber *et al.*, 1995) behoben werden. Es ermöglicht sowohl eine flächenbezogene Aussage über die Fluoreszenz wie auch eine Angabe über die Vitalität der Algen (Bestimmung der Quantenausbeute), so dass ein Vergleich zwischen den Oberflächen vereinfacht wäre (Schumann *et al.*, 2004). Neuerdings wird in einigen Fällen diese Methode bereits in der Praxis bei der Beurteilung der Algenbesiedlung von Baustoffen im Freiland eingesetzt (Eggert *et al.*, 2006; Sellner, 2006; von Werder *et al.*, 2006).

6.8 Folgerungen

Die Ergebnisse der Untersuchung zum Befall von Baustoffen mit aeroterrestrischen Algen lassen den Schluss zu, dass eine Schutzwirkung durch unbenetzbare Oberflächen generell gegeben ist. Bis auf wenige Ausnahmen führte eine hohe Unbenetzbarkeit zu geringer Besiedlung und bestätigt die Hypothese, dass die Wasserverfügbarkeit ein Schlüsselfaktor für die Besiedlung von Baustoffen anzusehen ist (Häubner *et al.*, 2006). Insgesamt fielen die Unterschiede in der Besiedlung der verschiedenen Baustoffe jedoch nicht besonders stark aus.

Die Verwendung superhydrophober Oberflächen ist aber dennoch umstritten. In einigen Experimenten wurde bereits die Effizienz selbstreinigender, unbenetzbarer Fassadenfarben als Schutz vor Mikroorganismen belegt (Born & Abdou, 2003). Andere Untersuchungen wiederum weisen auf die erhöhte Wasserverfügbarkeit bei

Kondensation auf stark hydrophoben Oberflächen hin (Büchli & Raschle, 2004; Erfurth, 2006; Fitz *et al.*, 2006; Krus *et al.*, 2006)), die als ein „Besiedlungsfenster“ bei diesen Oberflächen ausgenutzt werden kann. Die Kondensation auf superhydrophoben Oberflächen stellt somit einen zentralen Punkt dar, dessen genaue Erforschung noch notwendig ist. Auch die Frage, welche Art der Befeuchtung, Beregnung oder Betauung in der Praxis das bedeutendere Besiedlungsfenster für Algen darstellt, ist ebenfalls noch ungeklärt.

7. Einfluss der Kondensation auf die Superhydrophobie

Eine Grundlage für selbstreinigende Eigenschaften von strukturierten Oberflächen stellt die Unbenetzbarkeit dar. Diese kann jedoch, wie bereits in Kap. 3 beschrieben, durch unterschiedliche Faktoren wie beispielsweise Kondensation beeinträchtigt werden. In diesem Fall steht auf einer solchen Oberfläche temporär oder dauerhaft Wasser zur Verfügung, das als Grundlage für das Wachstum von Mikroorganismen dienen kann. Gleichzeitig kann man davon ausgehen, dass die selbstreinigenden Eigenschaften einer solchen Oberfläche unterdrückt sind (Lafuma & Quéré, 2003).

In dem nun folgenden Teil der Arbeit wird untersucht, wie sehr die Kondensation bei superhydrophoben, sowohl biologischen wie auch technischen Oberflächen die Benetzung verändert. Sollte die Kondensation generell eine Erhöhung der Benetzung superhydrophober Oberflächen hervorrufen und damit auch zum Verlust der Selbstreinigung führen, hätte dies große Auswirkungen auf technische Anwendungen dieser Oberflächen. Existieren jedoch Faktoren, welche den Einfluss der Kondensation verringern oder sogar vollständig unterdrücken, könnten diese als Basis für die Konstruktion technischer Oberflächen dienen, um besonders stabile, selbstreinigende Eigenschaften zu generieren.

7.1 Material und Methoden

Pflanzen

Es wurden insgesamt 13 Pflanzenarten untersucht (Tab. 7.1). Der Ursprung der verwendeten Pflanzen ist bereits im Kap. 2.1 angegeben. Ausgewählt wurden die Pflanzen basierend auf Literaturangaben (Neinhuis & Barthlott, 1997). Dabei wurde darauf geachtet, ein breites Spektrum unterschiedlich strukturierter Oberflächen abzudecken. Es wurden ausschließlich die Blätter der Pflanzen untersucht. Bei *Alocasia macrorrhiza* und *Xanthosoma robustum* wurde die Unterseite, bei allen übrigen Pflanzen die Oberseite der Blätter untersucht.

Raster-Elektronenmikroskopische Aufnahmen aller verwendeten pflanzlichen Oberflächen finden sich auf Bildtafeln 3-11 im Anhang A.

Tab. 7.1: Verwendete Pflanzen

	Art		Art
1	<i>Alocasia macrorrhiza</i>	8	<i>Halimodendron halodendron</i>
2	<i>Alstroemeria aurantiaca</i>	9	<i>Nelumbo nucifera</i>
3	<i>Apocynum cannabinum</i>	10	<i>Silene vulgaris</i>
4	<i>Argemone mexicana</i>	11	<i>Thalictrum flavum ssp. glaucum</i>
5	<i>Brassica oleracea</i>	12	<i>Tropaeolum majus</i>
6	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	13	<i>Xanthosoma robustum</i>
7	<i>Colocasia esculenta</i>		

Technische Oberflächen

Insgesamt wurden vier verschiedene technische Oberflächen untersucht: Zwei mit Sprays hergestellt, sowie zwei Kupferfolien (Tab. 7.2).

Die beiden Sprays können auf nahezu allen Untergründen eingesetzt werden und bestehen aus nanopartikulären, selbstorganisierenden Dispersionen. Bei den beiden Kupferfolien handelt es sich um Produkte aus der Elektronikindustrie, welche in einem galvanischen Prozess strukturiert werden. Durch eine nachträgliche Hydrophobierung wie im Kap. 2.2 beschrieben, erhalten diese Oberflächen superhydrophobe Eigenschaften.

Raster-Elektronenmikroskopische Aufnahmen der verwendeten technischen Oberflächen finden sich auf Bildtafeln 11-14 im Anhang A.

Tab. 7.2: Übersicht der verwendeten technischen Oberflächen inklusive ihrer Versuchsbezeichnungen

Hersteller	Versuchsbezeichnung
Circuit Foil Luxemburg, Wiltz (L)	Circuit Foil
Bolta-Werke GmbH, Gottmadingen	Bolta Folie
Creavis Innovations mbH, Marl	Creavis-Spray
BASF Future Business GmbH, Ludwigshafen (*eingetragenes Markenzeichen der BASF)	Mincor*-Spray

Versuchsbeschreibung

Um den Einfluss der Kondensation auf die Superhydrophobie zu prüfen, wurden kontrolliert Bedingungen geschaffen, unter denen dieses Phänomen stattfindet. Kondensation ist definiert als der Phasenübergang von gasförmig zu flüssig (Tipler, 1994). Um Kondensation auf einer Oberfläche zu erzielen, müssen Temperaturdifferenzen zwischen den beteiligten Phasen Luft, Wasser und Festkörper geschaffen werden. Damit ihre Auswirkungen auf die Superhydrophobie ermittelt werden konnten, musste die Kondensation während der Kontaktwinkel- und Abrollwinkelmessungen herbeigeführt werden. Drei verschiedene Konstellationen, wie in Abb. 7.1 dargestellt, standen für die vorliegenden Experimente zur Auswahl. Kondensation tritt auf, wenn die umgebende Luft wärmer ist als der Festkörper und der Wassertropfen (Abb. 7.1a). Auch wenn der Wassertropfen wärmer ist als der Festkörper, kann Kondensation erzielt werden (Abb. 7.1b).

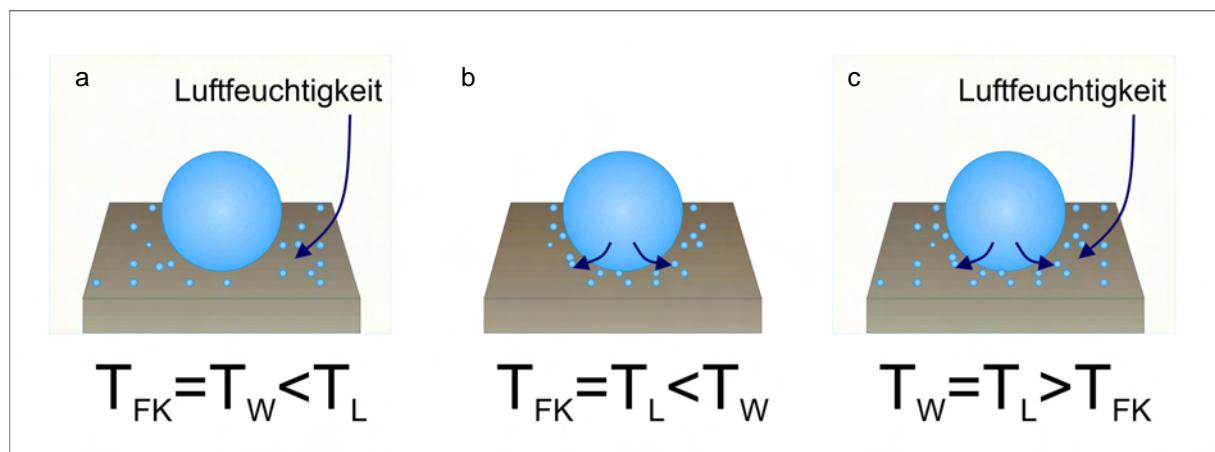


Abb. 7.1: Möglichkeiten der Temperaturregulierung für Kondensationsversuche am KW-Gerät. (T_{FK} = Temp. Festkörper; T_W = Temp. Wasser; T_L = Temp. Luft)

Die einfachste Methode, um während der Kontaktwinkelmessung die Kondensation zu kontrollieren, bestand in der Regulierung der Temperatur des Festkörpers. Bei Kühlung kondensierte das Wasser aus dem Tropfen und der Umgebungsluft auf der Oberfläche (Abb. 7.1c). Auf diese Weise konnten reproduzierbar Temperaturdifferenzen eingestellt werden, die es ermöglichten, die Auswirkung der Kondensation auf die Benetzbarkeit direkt am Kontaktwinkelmessgerät zu messen.

Die Benetzbarkeit wurde über die Kontaktwinkel und über die Abrollwinkel ermittelt, wobei die Messungen bei vier unterschiedlichen Oberflächentemperaturen (isotherme Bedingungen $\Delta \pm 0^\circ\text{C}$, $\Delta -5^\circ\text{C}$, $\Delta -10^\circ\text{C}$, $\Delta -15^\circ\text{C}$) durchgeführt wurden.

Um eine Aussage treffen zu können, ob tatsächlich die Kondensation für mögliche Veränderungen der Benetzbarkeit verantwortlich ist, wurden zusätzlich im zweiten Teil dieser Untersuchung bei einigen ausgewählten Oberflächen die Kontakt- und Abrollwinkel von Glycerin anstatt von Wasser erfasst. Reines Glycerin besitzt ähnlich wie Wasser eine sehr hohe Oberflächenspannung (64 mN/m), die Kondensation ist jedoch unter den eingestellten Temperaturbedingungen vernachlässigbar.

Im dritten Teil der Untersuchung wurde an einigen wenigen Oberflächen der Einfluss der Kondensation im Verlauf der Zeit beobachtet. Dafür wurde eine bestimmte Oberflächentemperatur eingestellt, ein Wassertropfen abgesetzt und kontinuierlich über die Zeit der Kontaktwinkel gemessen.

Für die Interpretation der Ergebnisse wurden die Oberflächen zusätzlich im REM dokumentiert und beschrieben. Die Beschreibung der pflanzlichen Oberflächen orientierte sich an den Definitionen von Barthlott & Ehler (1977) sowie Barthlott & Wollenweber (1981).

Kontaktwinkelmessung

Der Kontaktwinkelmessung sowie die Präparation der Proben wurde wie im Kap. 2.2 beschrieben durchgeführt. Von allen Proben wurden jeweils 10 Einzelmesswerte an unterschiedlichen Stellen einer Oberfläche erfasst und das arithmetische Mittel sowie das 95%-Konfidenzintervall bestimmt. In einigen Fällen wurden Werte $>175^\circ$ gemessen, die jedoch auf eine fehlerhafte Erkennung der Tropfenkontur zurückzuführen waren. Diese Werte wurden als Fehlmessungen interpretiert und bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Falls ein Tropfen nicht auf der Oberfläche abgesetzt werden konnte ohne wegzurollen, wurde ein kleineres Tropfenvolumen von $5\mu\text{l}$ verwendet. Auf *N. nucifera* wurden statt 10 insgesamt 18 KW ermittelt.

Zu Vergleichszwecken wurden auch Kontaktwinkelmessungen mit 99,6%igem Glycerin (AppliChem GmbH, Darmstadt) durchgeführt. Da das hochprozentige Glycerin sehr viskos ist, konnte die automatische Dosierungseinheit der Kontaktwinkelapparatur nicht angewendet werden. Die Applikation von $15\mu\text{l}$ großen Tropfen erfolgte deshalb von Hand mit einer $50\mu\text{l}$ -Eppendorfpipette. Ansonsten wurde wie in Kap. 2.2 beschrieben verfahren.

Die Kontaktwinkelmessung mit Glycerin wurde nur an einer Auswahl von fünf der 13 verwendeten Pflanzenarten durchgeführt (Tab. 7.3).

Alle Messungen erfolgten bei 21°C und 40-50% rel. Luftfeuchtigkeit.

Tab. 7.3: Verwendete Pflanzen bei KW-Messungen mit Glycerin

	Art		Art
1	<i>Alocasia macrorrhiza</i>	4	<i>Tropaeolum majus</i>
2	<i>Brassica oleracea</i>	5	<i>Xanthosoma robustum</i>
3	<i>Colocasia esculenta</i>		

Abrollwinkelmessung

Die Abrollwinkelmessung erfolgte über eine integrierte Kippwinkelvorrichtung des Kontaktwinkelmessgeräts (s. Kap. 2.2). Nach dem Absetzen eines Tropfens über die automatische Dosierkanüle (15µl Aqua dest.) wurde jeweils mit 5 Sek. Verzögerung die Verkippung des Tisches gestartet. Die Kippgeschwindigkeit betrug 0,5° pro Sekunde. Die Messung wurde angehalten, wenn in Kippichtung die Dreiphasenkontaklinie sowohl an der Vorder- wie auch an der Rückseite des Tropfens verschoben wurde. In den meisten Fällen rollte in diesem Moment der Tropfen vollständig von der Oberfläche ab. Jeweils 10 Abrollwinkel an unterschiedlichen Stellen einer Oberfläche wurden gemessen und aus den Werten Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall bestimmt.

Wie bereits bei der Kontaktwinkelmessung beschrieben, konnte die Applikation der Glycerintropfen nicht mit der automatischen Dosiereinheit des Gerätes erfolgen. Die 15µl Tropfen wurden mit einer 50µl Eppendorfpipette abgesetzt. Die weiteren Verfahrensschritte waren identisch mit denen bei der Messung mit Wasser. Auch die Abrollwinkelmessungen mit Glycerin wurden nur mit fünf ausgewählten Pflanzen (vgl. Tab. 7.3) durchgeführt.

Vorrichtung zur Regelung der Oberflächentemperatur

Um den Einfluss der Temperatur auf die Benetzbarkeit zu messen, wurde für das Kontaktwinkelmessgerät eine Vorrichtung gebaut, mit der bei einer gegebenen Oberflächentemperatur direkt der Kontakt- oder der Abrollwinkel gemessen werden konnte. Für die Variation der Oberflächentemperatur wurde ein 20x20 mm² großes Peltier-Element (PE) (Typ PE 12708, Conrad Elektronik, Hirschau) verwendet. Durch Regelung des hindurchfließenden elektrischen Stromes ermöglicht das PE eine Regulation der Temperatur. Dabei wird eine Seite des Elements gekühlt, während die andere Seite erwärmt wird. Das PE wurde mit der sich erwärmenden Seite auf den

Messtisch des KW montiert. Zur Ableitung der Wärme an der Unterseite wurde das PE mittels silikonfreier Wärmeleitpaste (Conrad Elektronik, Hirschau) mit dem Messtisch verbunden. Auf der Oberseite des PE wurde ebenfalls Wärmeleitpaste verteilt. Darauf wurden die Proben gelegt, die jeweils mit doppelseitigem Klebeband auf einem Deckglas befestigt waren. Abb. 7.2 skizziert den Versuchsaufbau.

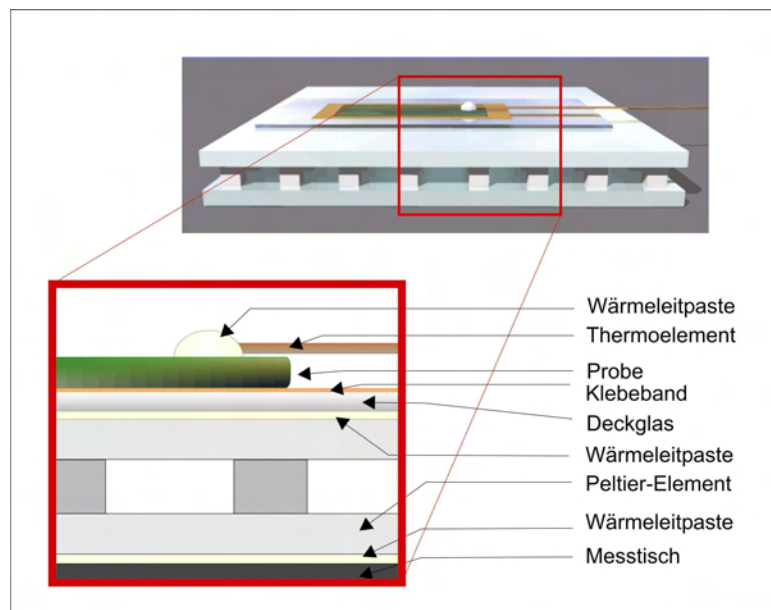


Abb. 7.2: Schematische Darstellung der Vorrichtung zur Veränderung der Oberflächentemperatur am Kontaktwinkelmessgerät

Zur Regelung der Temperatur wurde das PE in Reihe mit einem Vorwiderstand ($R = 3,3\Omega$) an ein Labor-Netzgerät (Typ EA-3016, Caldi GmbH, Ratingen) angeschlossen. Ein dazwischen geschaltetes Multimeter-Meter (DT-130NT, Profitec, Bremen) kontrollierte die Stromstärke. Über die Regulierung der Stromstärke wurde die Kühlung der Oberflächen geregelt. Je nach Dicke und Wärmeleitfähigkeit der Probe variierten die notwendigen Stromstärken, deshalb wurde die Oberflächentemperatur der Proben über ein dünnes Thermoelement (Kupfer-Konstantan-Drähte, $0,1\text{mm } \varnothing$) abgegriffen und mit einem angeschlossenen Multimeter (Voltcraft VC333, Conrad Elektronik, Hirschau) gemessen. Lag eine Abweichung der Proben temperatur vom Sollwert vor, wurde mit dem Netzgerät nachreguliert. Die Genauigkeit der Temperaturregulierung lag im Bereich von $\pm 1^\circ\text{C}$. Da das Herunterkühlen von Proben generell mit einer leichten Verzögerung erfolgte, wurden alle Messungen der Kontaktwinkel zur Sicherheit erst 60 Sekunden nach dem Einstellen der Stromstärke durchgeführt. Damit konnte gewährleistet werden, dass die gewünschte Solltemperatur erreicht wurde.

Thermographische Messungen

Zur Dokumentation des Temperaturverlaufs von abgesetzten Tropfen auf gekühlten superhydrophoben Oberflächen wurden thermographische Messungen durchgeführt. Diese erfolgten mit einer digitalen Thermokamera VARIOSCAN *high resolution* 3201 ST (Jenoptic Laser, Jena). Die erfasste IR-Strahlung lag in einem Wellenlängenbereich von 8-12 μm , bei einer Auflösung von $\pm 0,03^\circ\text{C}$. Die Aufnahmen mit einem Standardobjektiv ermöglichten ein Messfeld von $30^\circ \times 20^\circ$, wobei die Entfernung zu dem Messobjekt ca. 1m betrug. Die Auflösung der Thermogramme betrug 360×240 Pixel, wobei alle zwei Sekunden ein Bild gespeichert wurde. Neben dem thermographischen Bild wurden zwei Bereiche im Bild ausgewählt, bei denen die Temperatur festgehalten wurde. Diese entsprachen einmal einer Stelle auf der gekühlten Probenoberfläche und zum anderen der Mitte des abgesetzten Tropfens.

Eine Eichung des Gerätes auf die Emissionsfaktoren des gemessenen Blattgewebes, der technischen Oberflächen oder des Wassers erfolgte nicht, da die Temperaturdifferenzen für die Auswertung entscheidend waren und nicht die Absoluttemperaturen. Zudem wurde wie oben beschrieben kontinuierlich auch die Probenoberfläche mit einem Thermoelement abgegriffen, so dass eine Kontrolle der Temperaturen über einen Vergleich möglich war. Die über die Thermographie auf der Probenoberfläche erfassten Temperaturen stimmten bis auf $\pm 1^\circ\text{C}$ mit den über das Thermoelement gemessenen Temperaturen überein.

Rasterelektronenmikroskopie

Die Dokumentation der verwendeten Oberflächen wurde mittels hochauflösender Rasterelektronenmikroskopie wie in Kap. 2.2 beschrieben durchgeführt. Die entsprechenden Abbildungen befinden sich im Anhang A.

7.2 Ergebnisse

Charakterisierung der pflanzlichen Oberflächen

Alocasia macrorrhiza (Bildtafel 3)

Auf der Blattunterseite finden sich hexagonale Zellen mit gerade verlaufenden Antiklinen. Die Zellform ist tabular mit einer Papille. Auf der Zelloberfläche sind deutlich sehr starke Faltungen der Kutikula zu erkennen, die eine mittlere Faltungsdichte aufweisen. Die Zellen entsprechen dem Zentralfeld-Typ mit der typischen Aufteilung in Antiklinal- und Zentralfeld. Die Kutikularleisten laufen strahlenförmig auf die antiklinalen Grenzen zu und zum Teil auch darüber hinaus (Antiklinalfeld). Auf den Papillenspitzen wiederum liegen die Kutikularleisten ungeordnet-gekräuselt vor (Zentralfeld).

Alstroemeria aurantiaca (Bildtafeln 3 & 4)

Die Blattoberseite besitzt elongiert-polygonale Epidermiszellen. Diese sind unregelmäßig miteinander verlappt, die Antiklinalgrenzen sind eingesenkt. Die Zellen haben eine konvexe Form und sind vollständig mit feinen schuppenartigen Wachskristallen überzogen. Diese sind regelmäßig parallel angeordnet.

Apocynum cannabinum (Bildtafel 4)

Die Grundform der Zellen auf der Blattoberseite ist isodiametrisch-polygonal mit einem geraden Antiklinalverlauf. Die Zellen sind konvex bis halbkugelig und vollständig mit Wachskristallen überzogen. Die dicht und unregelmäßig stehenden Wachskristalle sind vom Typ „Schuppen“.

Argemone mexicana (Bildtafel 5)

Die Blattoberseite besteht überwiegend aus isodiametrisch-polygonalen Zellen mit gerade verlaufenden Antiklinalwänden. Die Epidermiszellen sind tabular-konvex. Vereinzelt aber regelmäßig kommen Spaltöffnungen auf der Blattoberseite vor. Die gesamte Oberfläche ist mit epikutikularen Wachsen überzogen. Diese bestehen aus Wachsröhrchen, die zu größeren Gruppen aggregiert sind. Dazwischen liegen Areale mit wenig oder keinen Wachsröhrchen.

Brassica oleracea (Bildtafeln 5 & 6)

Bei *B. oleracea* sind auf der Blattoberseite Zellen mit einer isodiametrisch-polygonalen Grundform zu finden. Die gerade verlaufenden Antiklinalgrenzen sind nur undeutlich

ausgebildet. Auf der Blattoberseite finden sich homogen verteilte Stomata. Die Zellen sind tabular bis leicht konvex geformt. Die gesamte Oberfläche ist mit feinen dendritisch verzweigten Wachsstäbchen überzogen.

Cercidiphyllum japonicum (Bildtafel 6)

Die Epidermiszellen haben überwiegend eine isodiametrisch-tetragonale Grundform. Die Zellen oberhalb der Blattadern sind dagegen elongiert-tetragonal. Die Antiklinen sind nur undeutlich ausgebildet und haben einen überwiegend geraden, manchmal unregelmäßig verlappten Verlauf. Die Zellen sind kegelförmig, in einigen Fällen aber auch halbkugelig und vollständig mit Wachskristallen überzogen. Die Wachse liegen in Form von Nonacosanol-Röhrchen vor, deren Dichte lokal heterogen ist.

Colocasia esculenta (Bildtafel 7)

Die Oberseite der Blätter weist Zellen mit einer isodiametrisch-polygonalen Grundform auf. Die gerade verlaufenden Antiklinen sind leicht eingesenkt. Die Zellform variiert von konvexen Zellen mit einer mehr oder weniger stark ausgebildeten zentralen Papille. Die gesamte Oberfläche ist bedeckt mit dicht stehenden schuppenförmigen Wachskristallen.

Halimodendron halodendron (Bildtafeln 7 & 8)

Die Blattoberseite besteht überwiegend aus isodiametrisch-polygonalen Zellen mit gerade verlaufenden Antiklinalgrenzen. Die Zellen sind meist konvex erhaben und mit unregelmäßig angeordneten Wachskristallen des Typs „Schuppen“ überzogen. Regelmäßig, jedoch mit einer geringen Dichte, sind an einigen Stellen eingesenkte Stomata zu erkennen.

Nelumbo nucifera (Bildtafel 8)

Die Blätter von *N. nucifera* weisen auf ihrer Oberseite Zellen mit einer isodiametrisch-polygonalen (hexagonalen) Grundform auf. Die Antiklinalgrenzen verlaufen gerade und sind leicht eingesunken. Die Zellform ist konvex mit einer zentralen ellipsenförmigen Papille. Die gesamte Oberfläche ist dicht mit Wachskristallen (Nonacosanol-Röhrchen) bedeckt.

Silene vulgaris (Bildtafel 9)

Die Grundform der Zellen von *S. vulgaris* ist überwiegend elongiert-polygonal, oft hexagonal. Die Antiklinen verlaufen gerade und sind nur undeutlich ausgebildet. Die konvexen Zellen sind vollständig mit Wachsen überzogen. Die homogen verteilten

Wachskristalle vom Typ „quergeriefte Stäbchen“ stehen jedoch nicht dicht zusammen. Die Blattoberseite weist eine hohe Dichte an regelmäßig angeordneten Stomata auf.

Thalictrum flavum (Bildtafeln 9 & 10)

Die Zellen der Blattoberseite sind teilweise isodiametrisch-polygonal, zum Teil auch elongiert-polygonal. Auch entsprechende Zwischenformen lassen sich finden. Die Zellen sind konvex mit nur undeutlich ausgeprägten, gerade verlaufenden Antiklinalgrenzen. Die gesamte Oberfläche wird von Wachskristallen des Typs Röhren (Nonacosanol) bedeckt.

Tropaeolum majus (Bildtafel 10)

Die Oberfläche von *T. majus* ist auf der Oberseite der Blätter aus isodiametrisch bis elongiert-tetragonalen Zellen mit s-unduliert verlaufenden Antiklinalwänden aufgebaut. Die Antiklinalgrenzen sind zudem leicht eingesenkt. Auf der Oberseite der Blätter finden sich vereinzelt, aber homogen verteilt Stomata. Die Zellform ist konvex. Die gesamte Oberfläche ist von epikutikularen Wachsen überzogen. Diese bestehen aus Röhren, die in Clustern zusammenstehen.

Xanthosoma robustum (Bildtafel 11)

Bei *X. robustum* ist die Unterseite der Blätter aus isodiametrisch-polygonalen Zellen mit gerade verlaufenden, nicht eingesenkten Antiklinalwänden aufgebaut. Die Zellform ist konvex mit einer Zentralpapille. Die Oberfläche ist mit verhältnismäßig großen schuppenförmigen Wachsen vollständig überzogen.

Charakterisierung der technischen Oberflächen

Circuit foil (Bildtafel 12)

Die Oberfläche dieser Kupferfolie besteht hauptsächlich aus globulären, nahezu glatten Erhebungen. Die Erhebungen haben im Mittel einen Durchmesser von ca. 1-2 μm und ragen 0,5-1 μm aus der Oberfläche heraus. Die einzelnen globulären Strukturen erzeugen zusammen eine leichte Welligkeit der Oberfläche mit einer Wellenlänge von ca. 10 μm und einer nur geringen Amplitude von ca. 2 - 2,5 μm .

Bolta Folie (Bildtafeln 11 & 12)

Diese Kupferfolie ist deutlich stärker strukturiert. Auch hier entstanden im galvanischen Prozess globuläre Strukturen, die jedoch stark ausdifferenziert sind. Der Durchmesser der Strukturen bewegt sich im Bereich von ca. 1-2 μm . Zahlreiche der Strukturen wirken wie Kugeln, die nur lose der Oberfläche aufliegen. Auch bei dieser Folie erzeugen die einzelnen Erhebungen eine gröbere Strukturebene (Welligkeit). Diese ist geprägt von deutlich abstehenden Konglomeraten, gebildet aus den globulären Strukturelementen. Die einzelnen Konglomerate bilden auf der gesamten Oberfläche grobe partikuläre Erhebungen mit mehreren Mikrometern Durchmesser.

Eine weitere Strukturebene findet sich überall auf den einzelnen globulären Erhebungen. Die gesamte Oberfläche ist mit feinen, Nanometer großen Kupfermonooxid-Nadeln besetzt, welche die Rauigkeit der Oberfläche stark vergrößern.

Mincor®-Spray (Bildtafel 13)

Dieses auf Glas aufgetragene Spray bildet nach Trocknung eine glatte Oberfläche. Nur die Unebenheiten des Substrats können an machen Stellen ausgemacht werden. Die Rauigkeit bilden lediglich Nanometer kleine Partikel, die vollkommen gleichmäßig und eben auf der Oberfläche verteilt sind. Ihr Durchmesser liegt im Bereich von 20-50 nm, wodurch sie erst bei ca. 5.000-facher Vergrößerung sichtbar werden.

Creavis-Spray (Bildtafeln 13 & 14)

Auch dieses Spray basiert auf Nanopartikeln. Nach dem Aufsprühen entsteht eine unebene, wellige Oberfläche, die von zahlreichen Furchen und Rissen durchzogen ist. Diese Unebenheiten liegen im Bereich von 10-100 μm . Die Nanopartikel selbst werden aufgrund ihrer Größe von ca. 50 nm erst bei ca. 5.000-facher Vergrößerung sichtbar.

Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Kontaktwinkel von Wasser bei Pflanzen

Alocasia macrorrhiza

Der Gleichgewichtskontaktwinkel von *A. macrorrhiza* lag unter isothermen Bedingungen bei 157° (Abb. 7.3). Bei -5°C Temperaturdifferenz lag eine tendenzielle Abnahme des KWs vor. Ab einer Temperaturdifferenz von $\Delta -10^\circ\text{C}$ war die Abnahme signifikant.

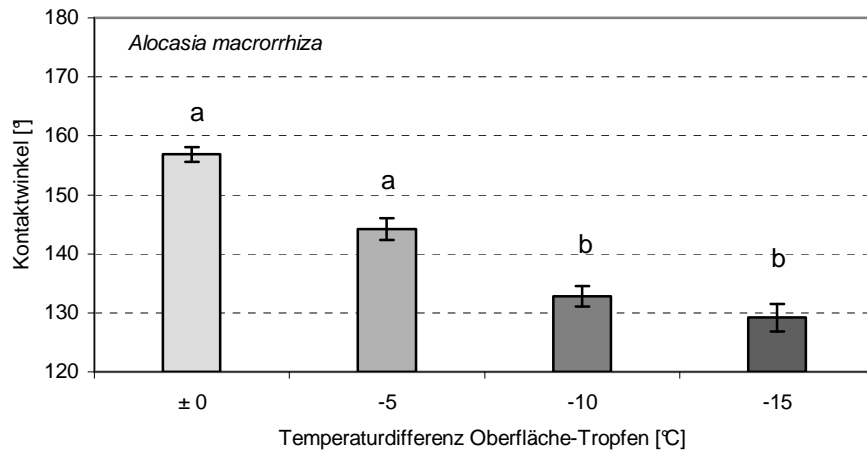


Abb. 7.3: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. macrorrhiza*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Alstroemeria aurantiaca

Der KW unter isothermen Bedingungen betrug bei *A. aurantiaca* 164° (Abb. 7.4). Unter Kondensationsbedingungen wurden signifikant niedrigere Werte gemessen. Zwischen den drei Kühlstufen konnten dagegen keine KW-Unterschiede festgestellt werden.

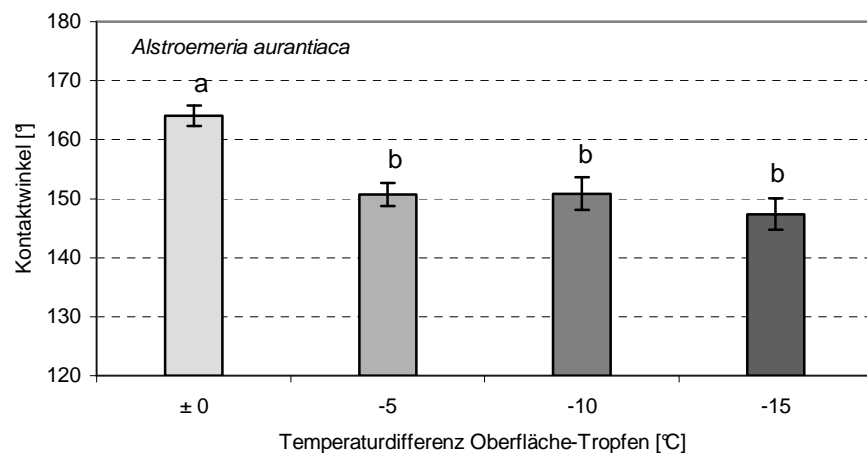


Abb. 7.4: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. aurantiaca*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Apocynum cannabinum

Der unter isothermen Bedingungen gemessene Kontaktwinkel betrug 162° (Abb. 7.5). Bei *A. cannabinum* führte die Kühlung der Oberfläche ebenfalls zu einer signifikanten Reduktion des KWs. Zwischen den drei Kühlniveaus wurden wiederum keine Unterschiede hinsichtlich des KWs festgestellt. Die Schwankung der Werte bei den Kühlschritten -5°C und -10°C war verhältnismäßig hoch.

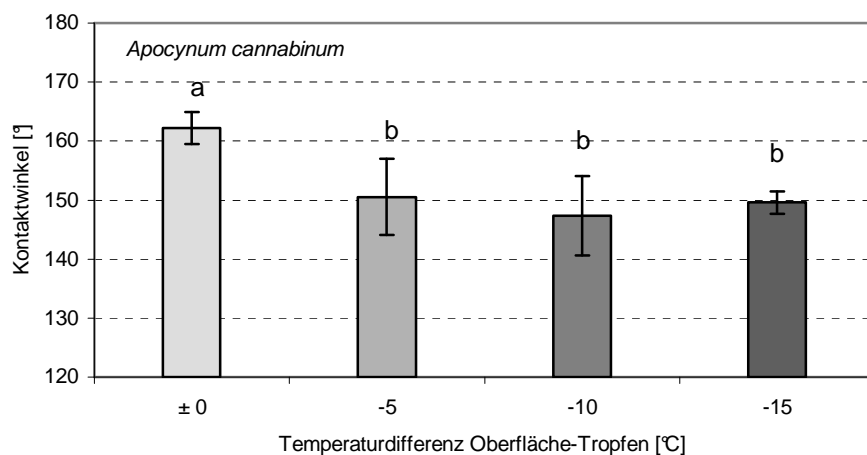


Abb. 7.5: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. cannabinum*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Argemone mexicana

Ohne eine Kühlung der Oberfläche wurde auf den Blättern von *A. mexicana* ein statischer Kontaktwinkel von 164° ermittelt (Abb. 7.6). Die Kühlung der Oberfläche bewirkte eine stufenweise Reduktion des Kontaktwinkels. Der Wert bei Kühlung um 15°C betrug noch $147,3^\circ$. Aufgrund der verhältnismäßig starken Schwankung der Werte unterschieden sich die KW-Werte der jeweils aufeinander folgenden Kühlstufen nicht signifikant von einander. Die Kontaktwinkel der zweiten und der dritten Kühlstufe waren jedoch signifikant geringer als der Kontaktwinkel ohne Kühlung.

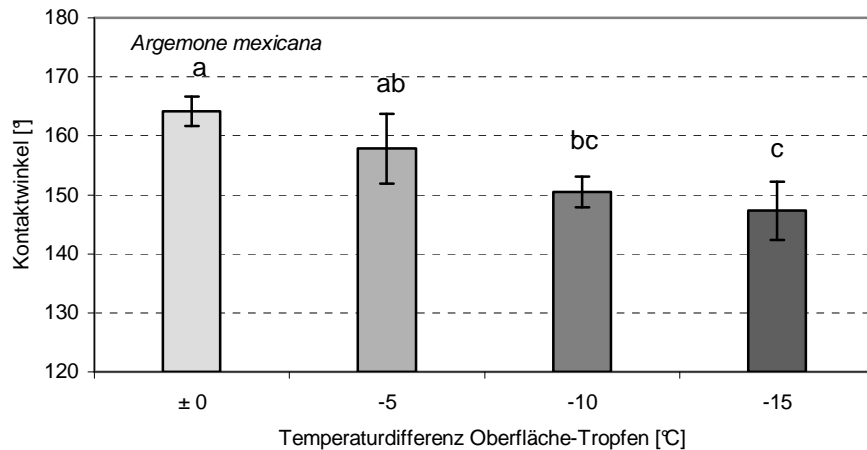


Abb. 7.6: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. mexicana*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Brassica oleracea

Bei isothermen Verhältnissen wurde auf *B. oleracea* ein Gleichgewichtskontaktwinkel von 161° gemessen (Abb. 7.7). Eine Reduktion der Oberflächentemperatur verringerte den KW stark. Bereits die erste Temperaturkühlstufe mit der Differenz von -5°C führte zu einer signifikanten Verringerung des KWs um fast 20° . Eine weitere Kühlung auf um 10°C wirkte sich kaum aus. Erst der nächste Kühlschritt führte wieder zu einer deutlichen Abnahme des KWs.

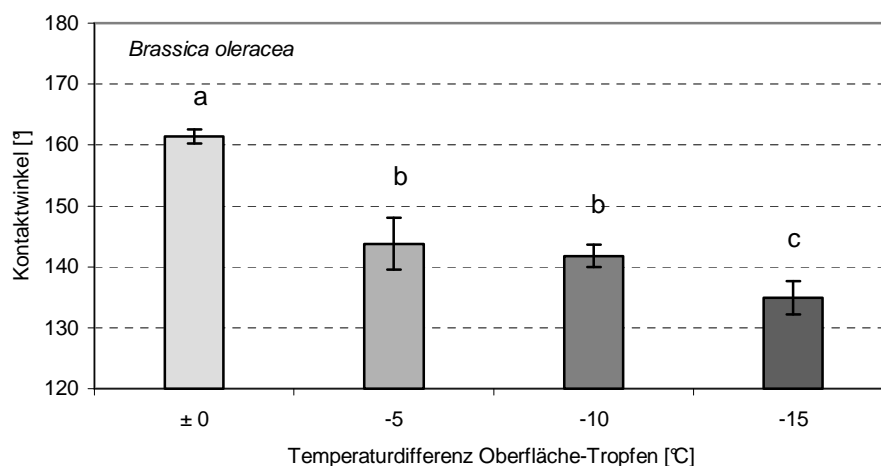


Abb. 7.7: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *B. oleracea*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Cercidiphyllum japonicum

Der Kontaktwinkel auf den Blättern von *C. japonicum* betrug 165° und gehört damit zu den höchsten, die in dieser Untersuchung auf den natürlichen Oberflächen gemessen wurden (Abb. 7.8). Bei der ersten ($\Delta-5^\circ\text{C}$) und der letzten Kühlstufe ($\Delta-15^\circ\text{C}$) war der KW signifikant geringer. Ein Unterschied zum KW bei der eingestellten Differenz von -10°C lag nicht vor. Es konnte auch kein Unterschied zwischen den drei Kühlstufen festgestellt werden.

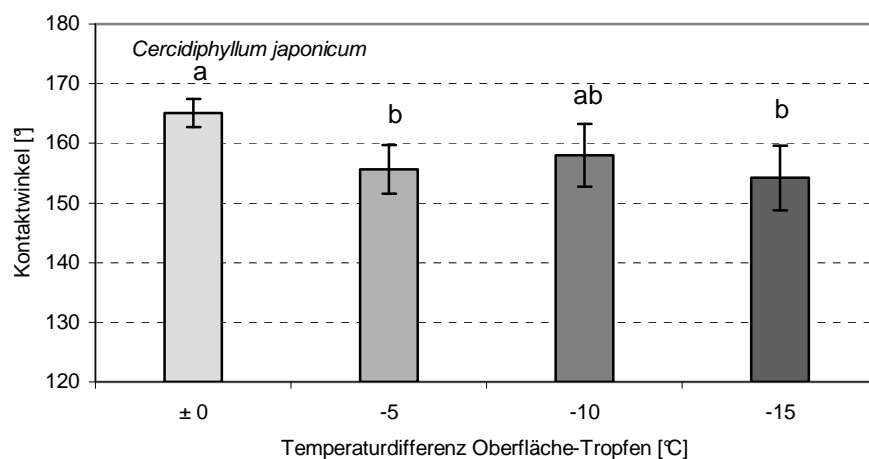


Abb. 7.8: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *C. japonicum*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Colocasia esculenta

Der Kontaktwinkel bei *C. esculenta* betrug unter isothermen Bedingungen 165° (Abb. 7.9). Eine Kühlung der Oberfläche wirkte sich nur gering, aber signifikant aus. Die KWs fielen nie unter 150° . Ein Unterschied im KW bei den Kühlstufen von $\Delta-10^\circ\text{C}$ und $\Delta-15^\circ\text{C}$ lag nicht vor.

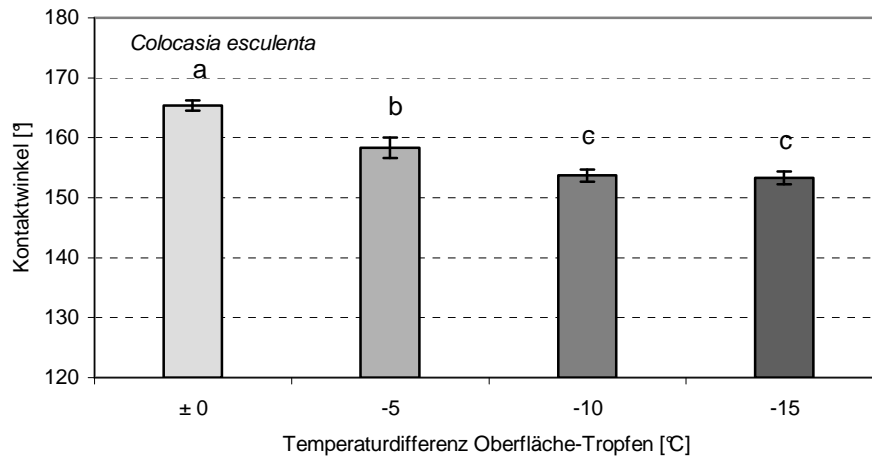


Abb. 7.9: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *C. esculenta*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Halimodendron halodendron

Unter isothermen Bedingungen wurde auf der Blattoberseite von *H. halodendron* ein Kontaktwinkel von 161° gemessen (Abb. 7.10). Im Verlauf der stufenweisen Kühlung der Oberfläche fiel dieser Wert kontinuierlich um bis zu 16°. Erst bei der zweiten Kühlstufe lag ein signifikanter Unterschied zum Anfangskontaktwinkel vor.

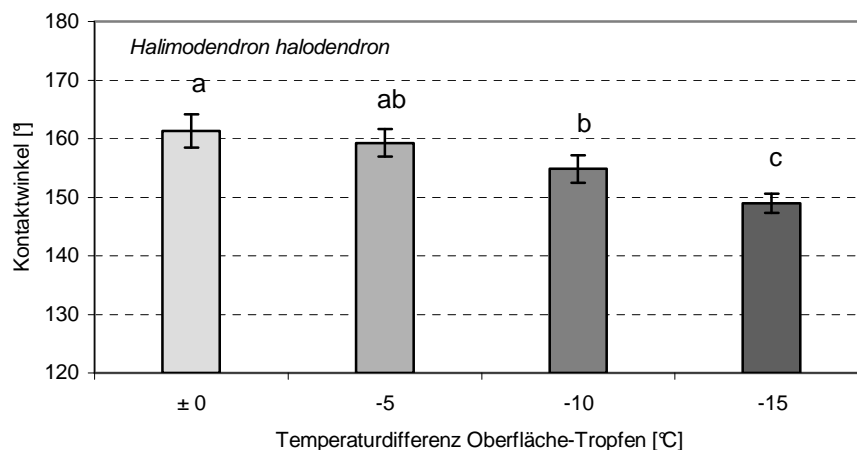


Abb. 7.10: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *H. halodendron*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Nelumbo nucifera

Auf *N. nucifera* wurde unter isothermen Bedingungen ein Gleichgewichtskontaktwinkel von 163° gemessen (Abb. 7.11). Die Werte betragen stets mehr als 160° , zwischen den Kühlstufen waren keine Unterschiede festzustellen.

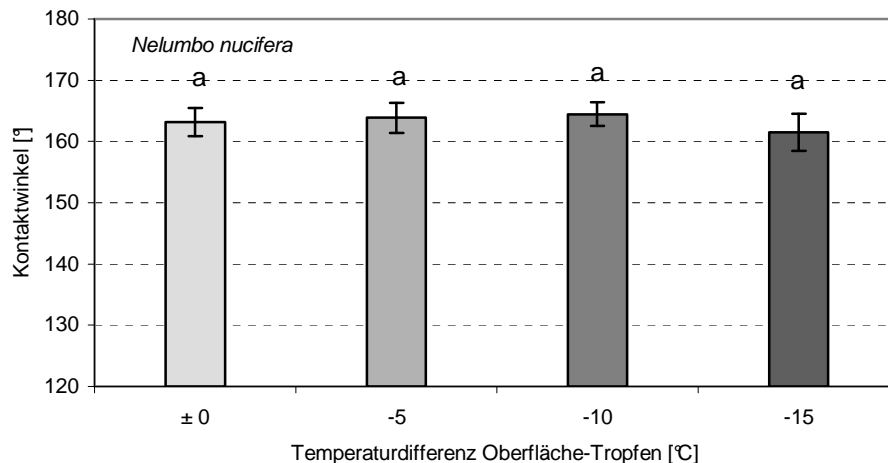


Abb. 7.11: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *N. nucifera*. Mittelwerte aus 18 Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Silene vulgaris

Auf den Blättern von *S. vulgaris* wurde unter isothermen Bedingungen ein Kontaktwinkel von 162° gemessen (Abb. 7.12). Eine signifikante Änderung des KWs wurde bei einer Temperaturdifferenz von -5°C verzeichnet. Die KWs der nachfolgenden Kühlschritte unterschieden sich nicht voneinander, lediglich als Trend war eine Abnahme erkennbar.

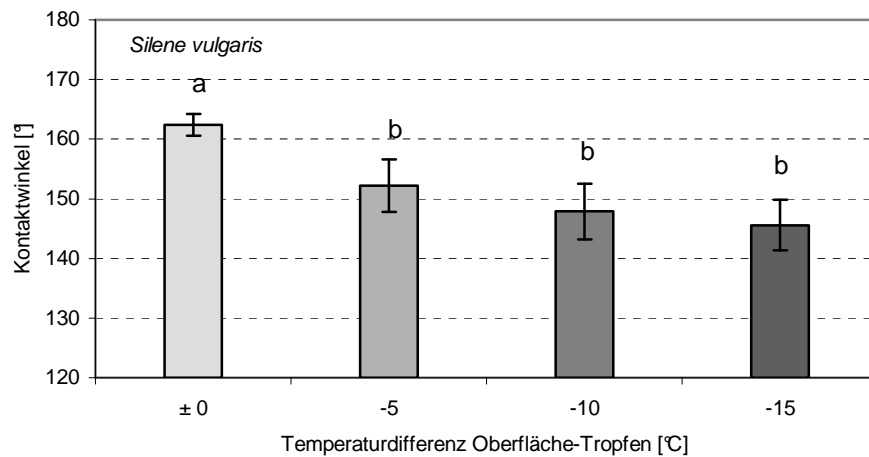


Abb. 7.12: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *S. vulgaris*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Thalictrum flavum

Der Gleichgewichtskontaktwinkel betrug auf *T. flavum* 162° (Abb. 7.13). Während nach der ersten Temperaturkühlstufe der Kontaktwinkel nur um wenige Grad sank, stellte sich bei $\Delta -10^{\circ}\text{C}$ ein signifikant geringerer KW ein. Bei $\Delta -15^{\circ}\text{C}$ stieg der Kontaktwinkel tendenziell wieder an.

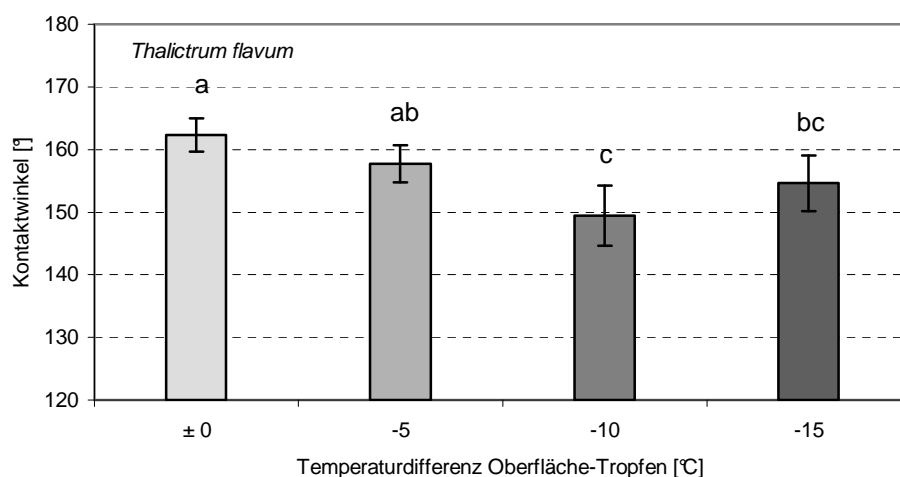


Abb. 7.13: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *T. flavum*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Tropaeolum majus

Unter isothermen Bedingungen betrug der Kontaktwinkel auf den Blättern von *T. majus* 162° (Abb. 7.14). Während der KW bei der Kühlung um $\Delta -5^\circ\text{C}$ nicht sank, fiel er bei den weiteren Kühlschritten jeweils signifikant ab.

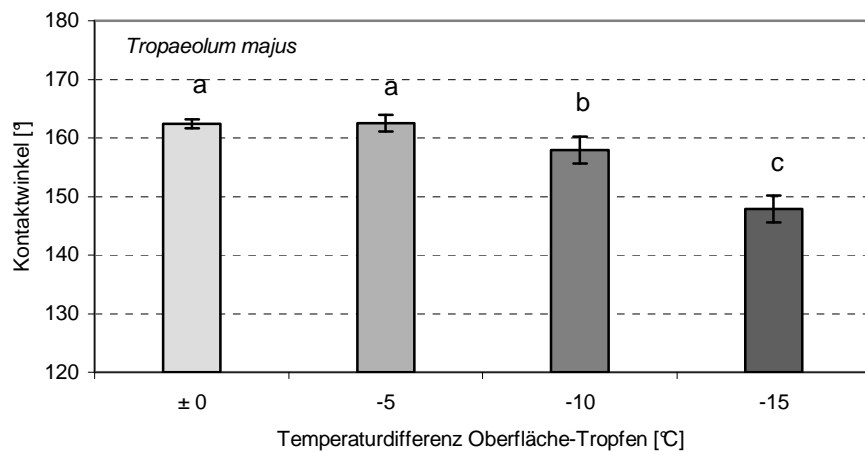


Abb. 7.14: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *T. majus*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Xanthosoma robustum

Der Kontaktwinkel erreichte unter isothermen Bedingungen 158° (Abb. 7.15). Bei Kühlung von *X. robustum* verringerte sich der KW zunächst nicht. Erst bei Kühlung der Oberfläche um $\Delta -15^\circ\text{C}$ fiel der KW-Wert signifikant ab.

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

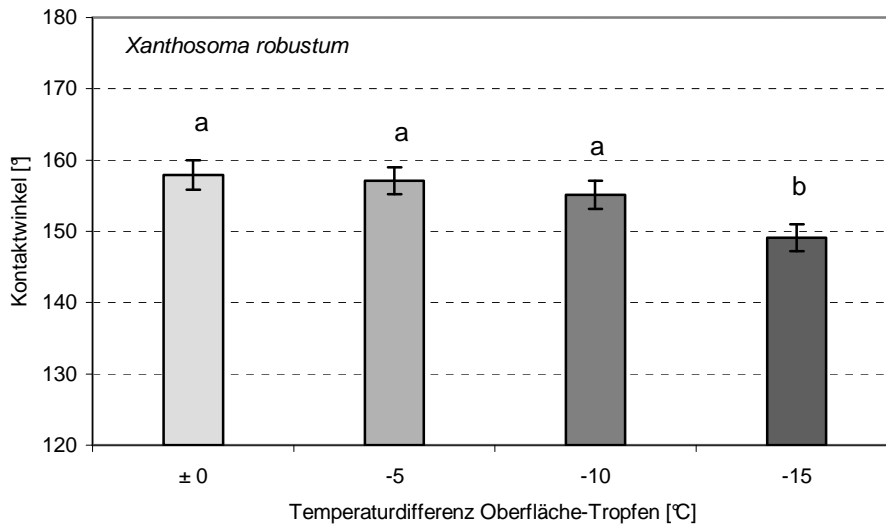


Abb. 7.15: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *X. robustum*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Abrollwinkel von Wasser bei Pflanzen

Alocasia macrorrhiza

Unter isothermen Bedingungen betrug der AW von Wasser bei *A. macrorrhiza* $7,8^\circ$ (Abb. 7.16). Bereits eine Kühlung der Oberfläche von nur 5°C führte zum vollständigen Anhaften des Tropfens. Selbst bei der Maximalverkipfung der Apparatur von 90° wurde kein Abrollen der Tropfen beobachtet.

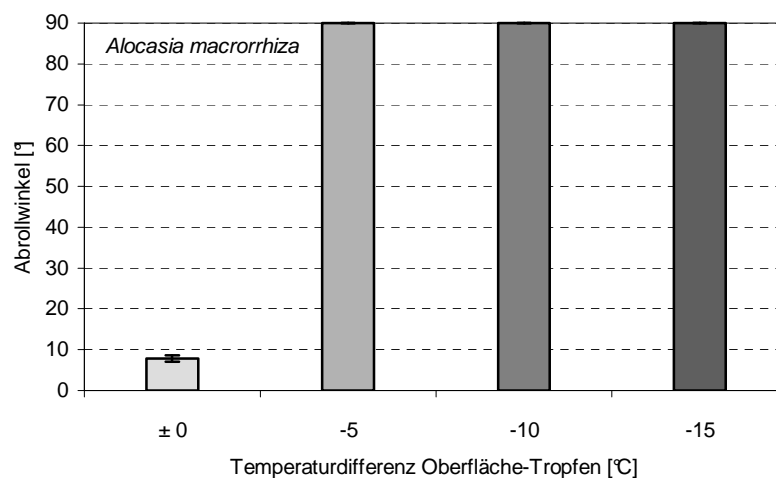


Abb. 7.16: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. macrorrhiza*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Alstroemeria aurantiaca

Unter isothermen Bedingungen belief sich der AW auf $6,2^\circ$ (Abb. 7.17). In der Messreihe mit der um 5°C gekühlten Oberfläche war der Abrollwinkel signifikant größer. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Tropfen und Oberfläche eingestellt war, desto größer wurden auch die Abrollwinkel. Bei der eingestellten Temperaturdifferenz von -15°C hafteten die Tropfen vollständig an der Oberfläche und rollten auch bei einem Kippwinkel von 90° nicht ab.

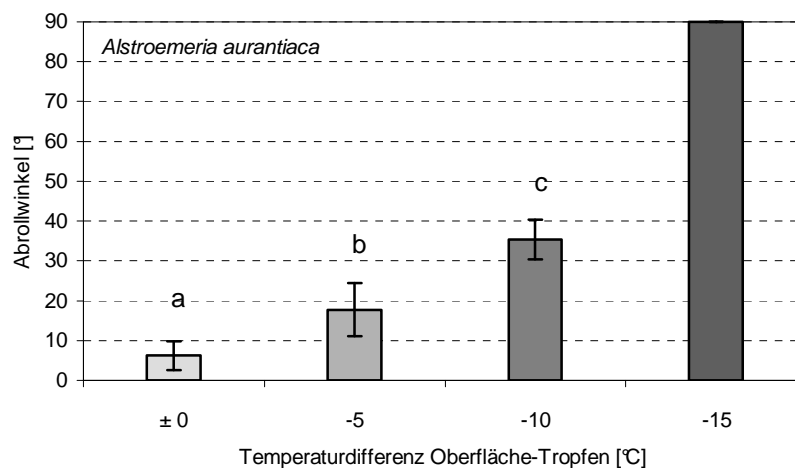


Abb. 7.17: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. aurantiaca*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Apocynum cannabinum

Unter isothermen Bedingungen betrug der AW $13,3^\circ$ (Abb. 7.18). Bereits nach Kühlung der Oberfläche um 5°C stieg der AW auf über 60° an. Als Trend setzte sich diese Entwicklung bei den übrigen Kühlstufen fort. Bei $\Delta -15^\circ\text{C}$ rollte der Tropfen nicht mehr ab.

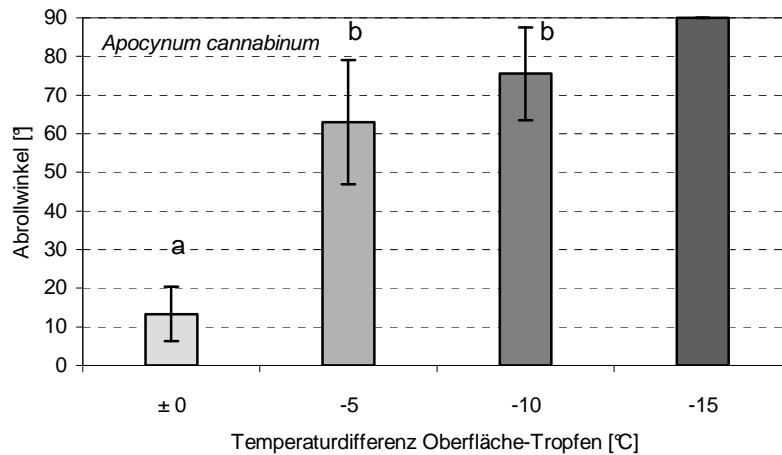


Abb. 7.18: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. cannabinum*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Argemone mexicana

Bei *A. mexicana* lag der Abrollwinkel unter isothermen Bedingungen bei ca. 2° (Abb. 7.19). Der AW änderte sich stark bei Kühlung der Oberfläche. Bereits nach dem ersten Temperaturkühlschritt stieg er auf über 20° an. Eine weitere Kühlung der Oberfläche bewirkte keine signifikante Veränderung des Abrollwinkels mehr.

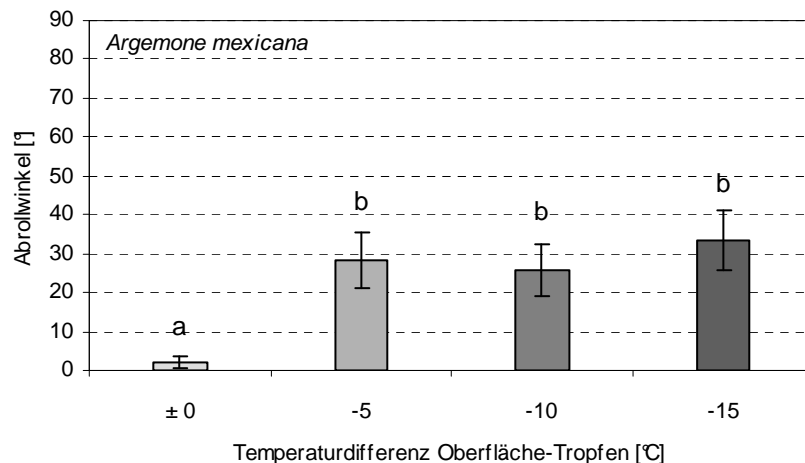


Abb. 7.19: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. mexicana*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Brassica oleracea

Die Abrollwinkelmessung war bei *B. oleracea* kaum durchführbar, da die Tropfen selbst bei kleinsten Neigungswinkeln von der Oberfläche abrollten. Der AW unter isothermen

Bedingungen betrug $\sim 1^\circ$ (Abb. 7.20). Bereits eine Kühlung der Oberfläche um 5°C führte zu einem stark veränderten Benetzungsverhalten. Der AW stieg auf über 20° . Mit jeder weiteren Kühlstufe stieg der Wert weiter signifikant an.

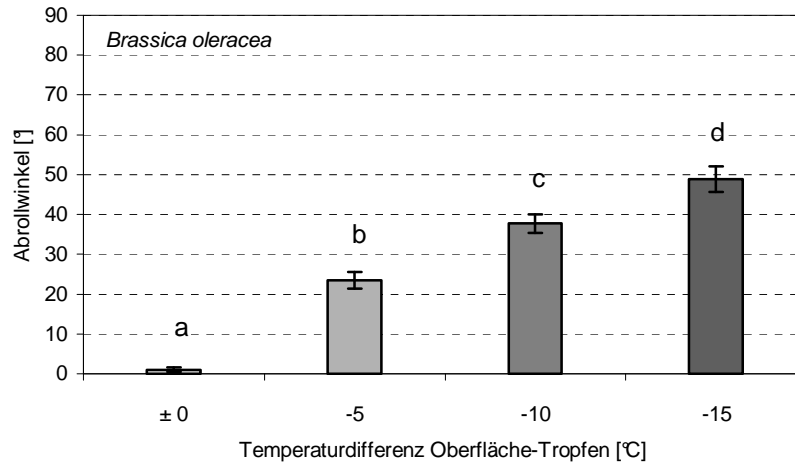


Abb. 7.20: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *B. oleracea*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Cercidiphyllum japonicum

Der AW bei isothermen Bedingungen betrug $13,5^\circ$ (Abb. 7.21). Eine Verringerung der Oberflächentemperatur um 5°C bzw. 10°C führte zu keiner Änderung des AWs. Erst eine Kühlung der Oberfläche um $\Delta -15^\circ\text{C}$ erhöhte den Abrollwinkel signifikant.

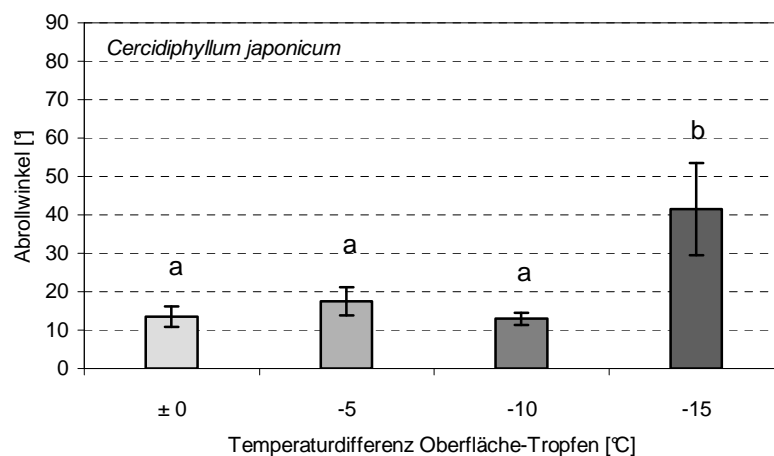


Abb. 7.21: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *C. japonicum*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Colocasia esculenta

C. esculenta besitzt extrem unbenetzbare Blätter. Trotz einer Kühlung der Oberfläche blieb der AW bei allen drei Kühlstufen unterhalb von 10° (Abb. 7.22). Unter isothermen Bedingungen betrug er $1,7^\circ$ und wurde mit jedem Kühlschritt signifikant größer.

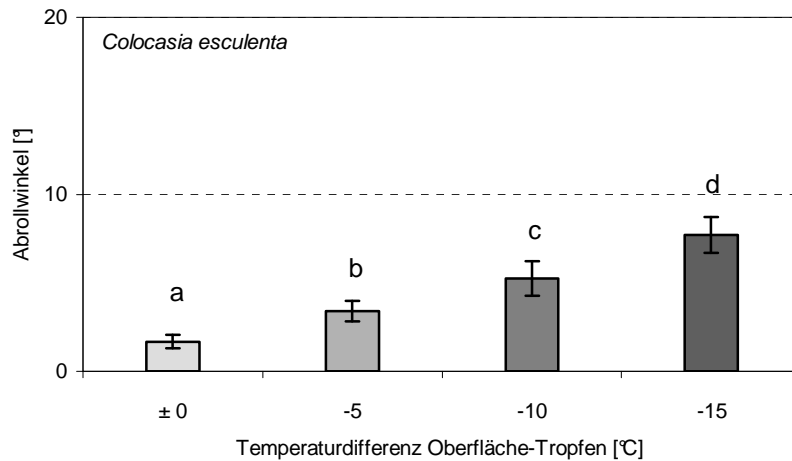


Abb. 7.22: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *C. esculenta*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Halimodendron halodendron

Bei *H. halodendron* rollten die Tropfen unter isothermen Bedingungen bei ca. 7° ab (Abb. 7.23). Bei den Kühlstufen $\Delta -5^\circ\text{C}$ und $\Delta -10^\circ\text{C}$ war ein allmählicher Anstieg des AWs zu verzeichnen. Bei Kühlung um $\Delta -15^\circ\text{C}$ fand eine sprunghafte Zunahme des AWs statt.

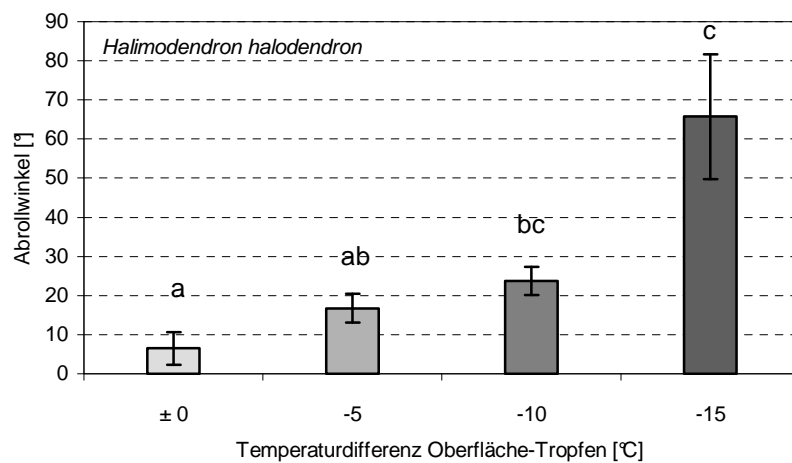


Abb. 7.23: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *H. halodendron*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Nelumbo nucifera

Bei den Blättern von *N. nucifera* wirkte sich die Kühlung kaum aus. Der AW unter isothermen Bedingungen betrug $1,4^\circ$ (Abb. 7.24). Erst bei der größten Temperaturdifferenz von $\Delta -15^\circ\text{C}$ lag mit $5,5^\circ$ ein signifikant höherer AW vor.

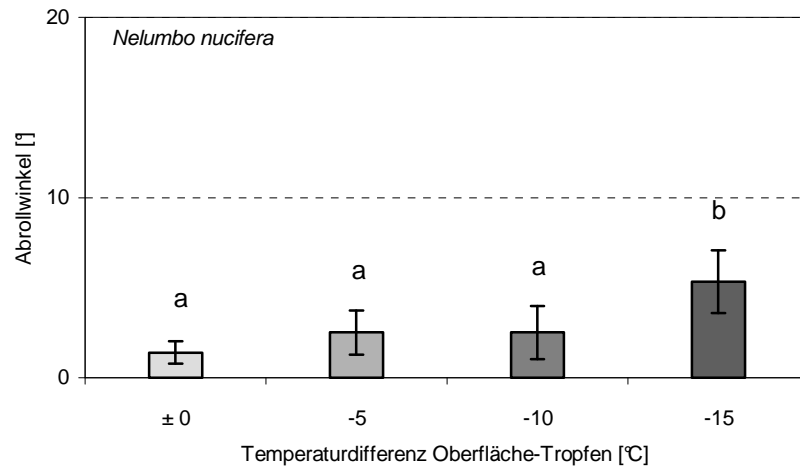


Abb. 7.24: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *N. nucifera*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Silene vulgaris

Bei *S. vulgaris* wirkte sich die Kühlung der Oberfläche sehr stark aus, so dass die Tropfen teilweise nicht mehr von der Oberfläche abrollten.

Unter isothermen Bedingungen lag der AW bei $11,8^\circ$ (Abb. 7.25). Bereits die erste Kühlstufe führte zu einem signifikanten Anstieg des AWs. Eine weitere Kühlung ($\Delta -10^\circ\text{C}$) erhöhte den AW nur noch tendenziell, bei $\Delta -15^\circ\text{C}$ rollte kein Tropfen mehr von der Oberfläche ab.

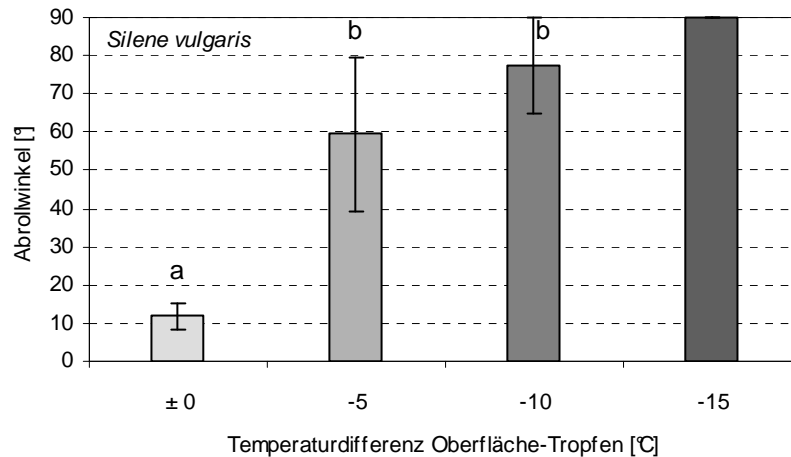


Abb. 7.25: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *S. vulgaris*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Thalictrum flavum

Auch bei *T. flavum* wurde der AW mit fallender Oberflächentemperatur größer. Der Abrollwinkel unter isothermen Temperaturbedingungen betrug $5,1^\circ$ (Abb. 7.26). Bei Kühlung der Oberfläche stieg der Abrollwinkel deutlich an, von einem Kühschritt zum jeweils nächsten Kühschritt jedoch nicht signifikant. Bei einer Kühlung um $\Delta -15^\circ\text{C}$ rollten in einigen Messungen die Tropfen selbst bei 90° nicht mehr ab.

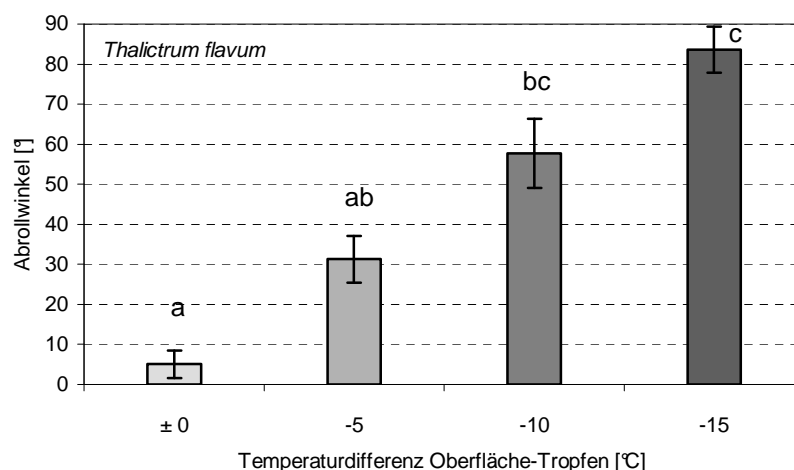


Abb. 7.26: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *T. flavum*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)

Tropaeolum majus

Der Abrollwinkel von *T. majus* unter isothermen Bedingungen war mit $1,6^\circ$ sehr gering (Abb. 7.27). Eine Kühlung der Oberfläche bewirkte eine kontinuierliche, jeweils signifikante Erhöhung des AW bis auf $\sim 20^\circ$.

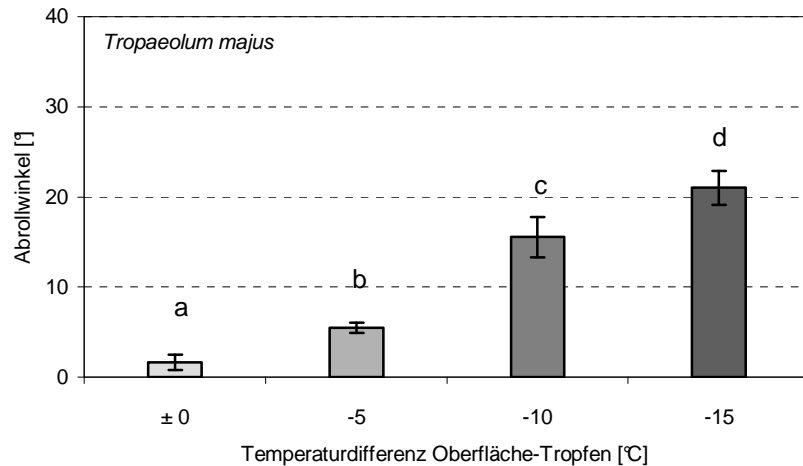


Abb. 7.27: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *T. majus*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Xanthosoma robustum

Bei *X. robustum* wurde unter isothermen Bedingungen ein Abrollwinkel von $2,5^\circ$ gemessen (Abb. 7.28). Eine Kühlung der Oberfläche erhöhte ihn bei allen Temperaturdifferenzen signifikant. Der Anstieg war aber in allen Fällen nur moderat. Erst bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta -15^\circ\text{C}$ stieg der Wert auf über 10° an.

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

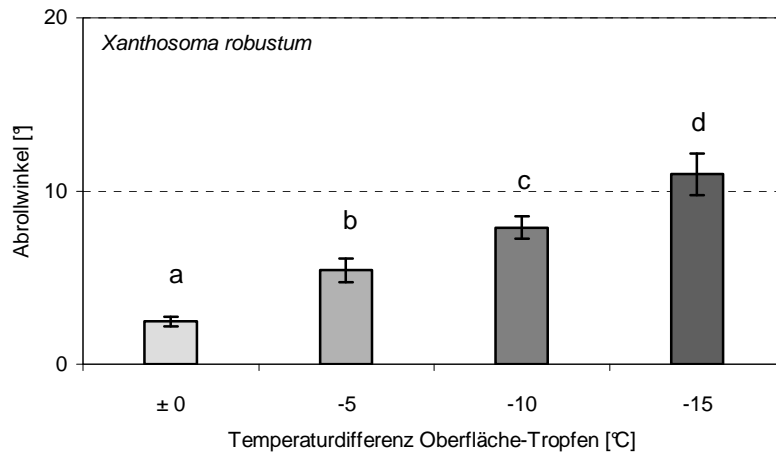


Abb. 7.28: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *X. robustum*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Vergleichende Betrachtung des Benetzungsverhaltens von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen bei einer Temperaturdifferenz von -15°C .

Eine Kühlung von -15°C wirkte sich auf die untersuchten pflanzlichen Oberflächen unterschiedlich aus. Der Kontaktwinkel nahm bei allen Pflanzen um 7° - 17° ab (Abb. 7.29). Eine Ausnahme bildeten *A. macrorrhiza* und *B. oleracea* mit Abnahmen von mehr als 25° . Auffällig war, dass vor allem bei Pflanzen mit Röhrenwachsen nur geringe Kontaktwinkeländerungen zu verzeichnen waren.

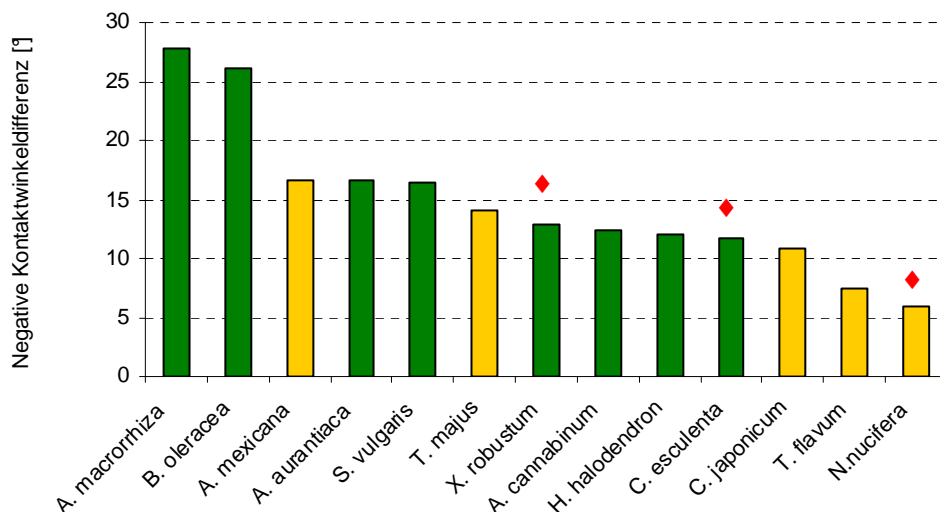


Abb. 7.29: Negative Differenz der Kontaktwinkel bei Oberflächenkühlung um -15°C , vergleichend dargestellt für 13 Pflanzenarten. Gelbe Säulen: Pflanzen mit Röhrenwachsen. Grüne Säulen: Pflanzen mit anderen Wachstypen. Rote Karos: doppelstrukturierte Oberflächen, bestehend aus ausgeprägten Zellpapillen kombiniert mit dreidimensionalen epikutikularen Wackskristallen.

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Auf den Abrollwinkel wirkte sich die Oberflächenkühlung deutlich stärker aus. Fünf der 13 untersuchten Pflanzenarten zeigten eine Zunahme des AWs um über 70° (Abb. 7.30). Nur *X. robustum*, *C. esculenta* und *N. nucifera* wiesen eine Zunahme von weniger als 10° auf. Die Pflanzen, bei denen sich die Oberflächenkühlung kaum oder nur wenig ausgewirkte, waren durch eine ausgeprägte Doppelstruktur gekennzeichnet. Daneben gehörten auch Pflanzen mit Röhrenwachsen zu den Oberflächen mit geringeren Abrollwinkeländerungen.

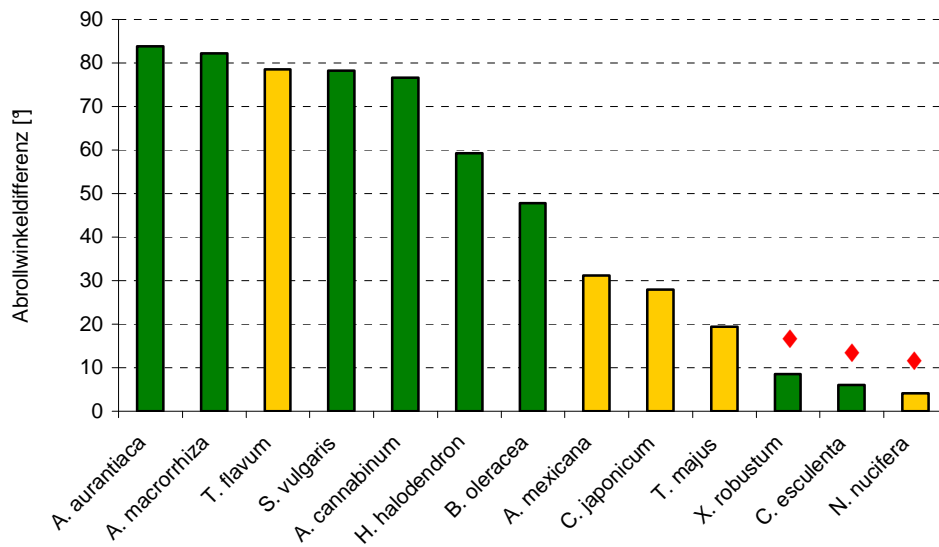


Abb. 7.30: Differenz der Abrollwinkel bei Oberflächenkühlung um -15°C , vergleichend dargestellt für 13 Pflanzenarten. Gelbe Säulen: Pflanzen mit Röhrenwachsen. Grüne Säulen: Pflanzen mit anderen Wachstypen. Rote Karos: doppelstrukturierte Oberflächen, bestehend aus ausgeprägten Zellpapillen kombiniert mit dreidimensionalen epikutikularen Wachskristallen

Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Kontakt- und Abrollwinkel von Glycerin bei ausgewählten Pflanzen

Um zu prüfen, in wieweit die Kondensation des Wassers einen Einfluss auf das Benetzungsverhalten hat, wurden in der folgenden Untersuchung Kontakt- und Abrollwinkel von Glycerin bei Kühlung der Oberflächen gemessen. Glycerin besitzt eine ähnlich hohe Oberflächenspannung ($64,0 \text{ mN/m}$) wie Wasser ($72,8 \text{ mN/m}$), kondensiert bei den vorgegebenen Temperaturunterschieden jedoch nicht. Mit dieser Flüssigkeit sollte keine oder nur eine sehr geringe Änderung der Benetzungseigenschaften auftreten.

Alocasia macrorrhiza

Der Kontaktwinkel von Glycerin auf *A. macrorrhiza* betrug unter isothermen Bedingungen 152° (Abb. 7.31). Eine Kühlung der Oberfläche wirkte sich kaum auf den Kontaktwinkel aus und bewirkte nur ein tendenzielles Absinken des KWs.

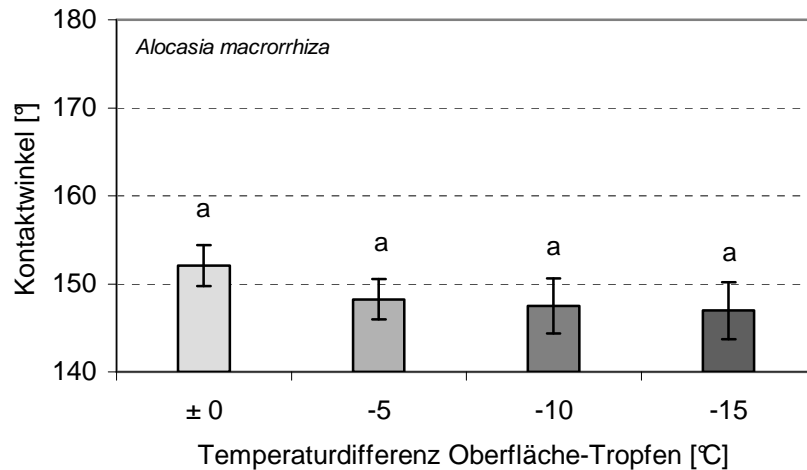


Abb. 7.31: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. macrorrhiza*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Eine Kühlung der Oberfläche hatte auch keinen Einfluss auf den AW (Abb. 7.32). Dieser lag unter isothermen Bedingungen bei $\sim 16^\circ$, selbst bei einer Temperaturdifferenz von -15°C blieb dieser Wert konstant.

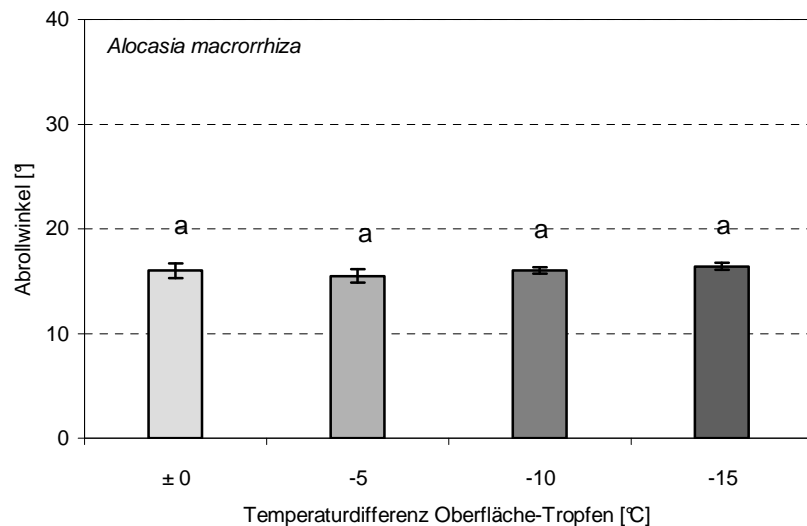


Abb. 7.32: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *A. macrorrhiza*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Brassica oleracea

Die Blätter von *B. oleracea* waren gegenüber Glycerin extrem unbenetzbar. Der bei isothermen Bedingungen gemessene KW lag bei 155° (Abb. 7.33). Bei weiterer Abkühlung der Oberfläche änderte sich dieser Wert nicht.

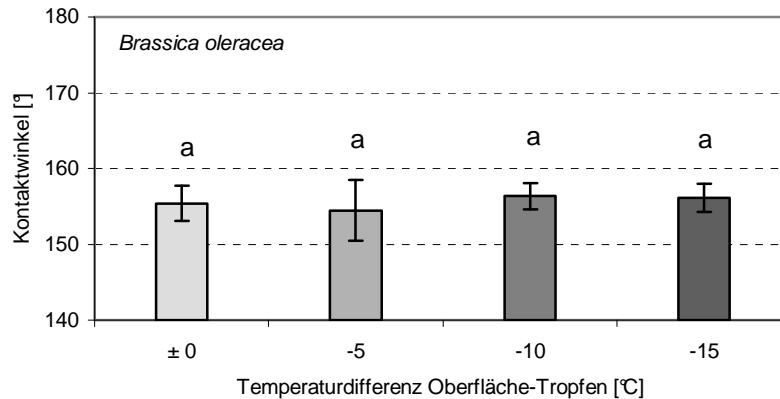


Abb. 7.33: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *B. oleracea*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Kein Einfluss der Oberflächentemperatur zeigte sich auch bei der Bestimmung des Abrollwinkels (Abb. 7.34). Unter isothermen Bedingungen rollte der Glycerintropfen bei einem Kippwinkel von ca. 4° ab. Dieser Wert änderte sich bei Kühlung der Oberfläche nicht.

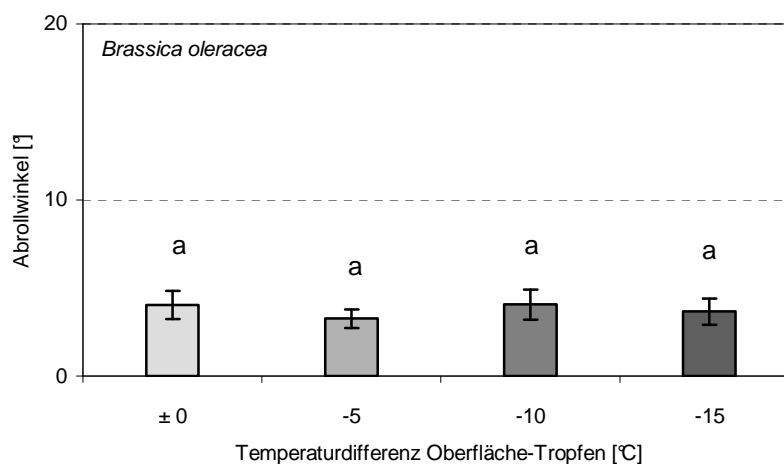


Abb. 7.34: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *B. oleracea*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Colocasia esculenta

Der Kontaktwinkel von Glycerin auf *C. esculenta* betrug bei gleicher Temperatur zwischen Oberfläche und Tropfen 159° . Dieser Wert änderte sich bei keiner Kühlstufe signifikant (Abb. 7.35).

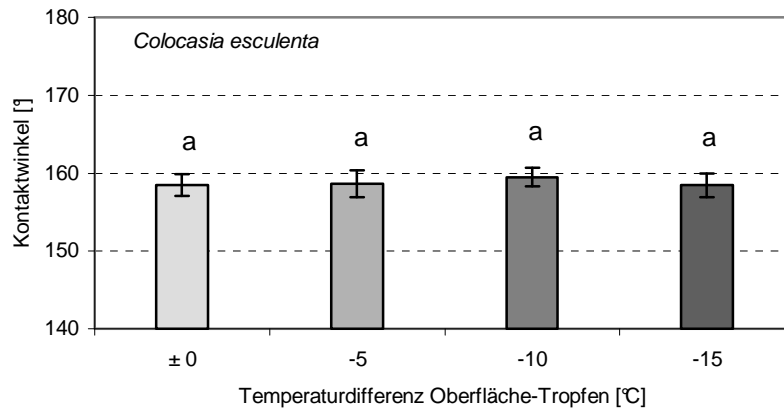


Abb. 7.35: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *C. esculenta*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Eine leichte Auswirkung der Oberflächentemperatur auf die Benetzung wurde beim Abrollwinkel beobachtet. Während unter isothermen Bedingungen der Abrollwinkel nahe 3° lag, erhöhte sich dieser Wert allmählich von Kühlstufe zu Kühlstufe (Abb. 7.36). Bei $\Delta -15^\circ\text{C}$ lag der AW gegenüber dem Anfangswert signifikant höher.

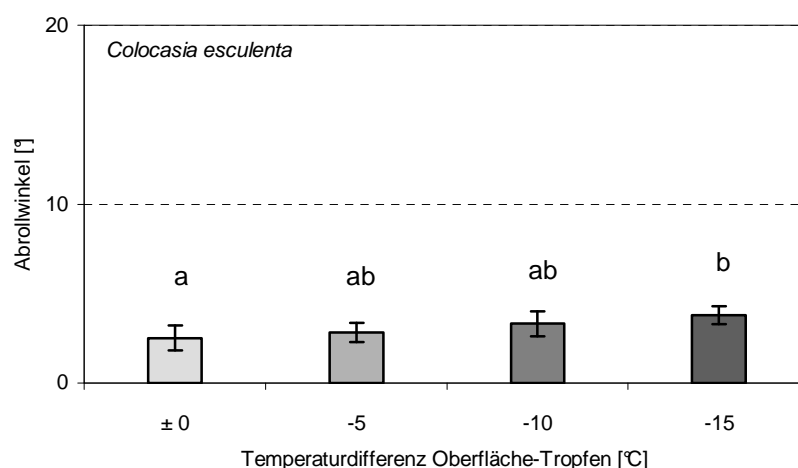


Abb. 7.36: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *C. esculenta*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Tropaeolum majus

Unter isothermen Bedingungen lag der Kontaktwinkel von Glycerin bei 159° (Abb. 7.37). Eine Kühlung der Oberfläche bewirkte ein tendenzielles Absinken des KWs pro Kühlstufe.

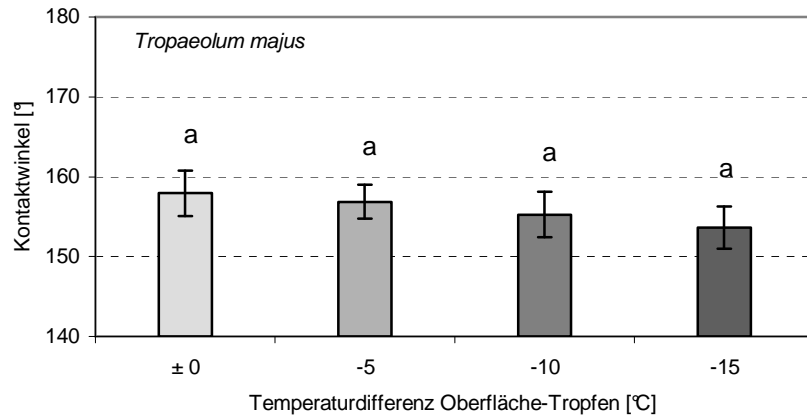


Abb. 7.37: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *T. majus* Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Der Abrollwinkel nahm bei Kühlung der Oberfläche von *T. majus* signifikant zu (Abb. 7.38). Während unter isothermen Bedingungen ein Abrollwinkel von $\sim 3,5^\circ$ ermittelt wurde, stieg dieser Wert kontinuierlich auf etwa 7° signifikant an.

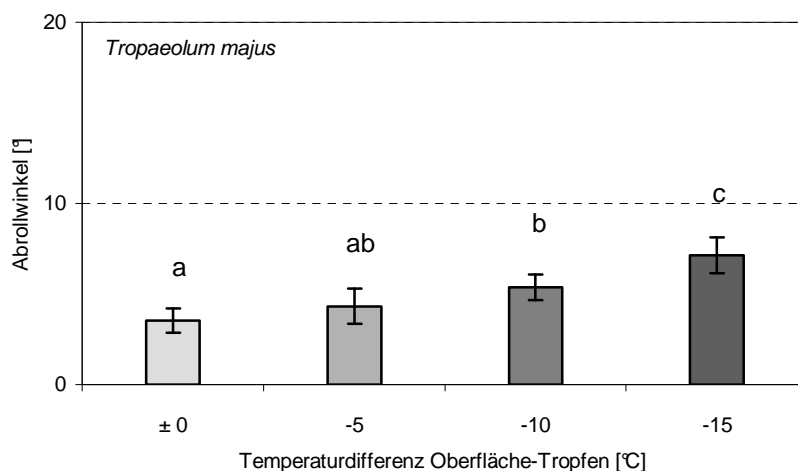


Abb. 7.38: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *T. majus*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Xanthosoma robustum

Bei *X. robustum* wurde keine Änderung des Benetzungsverhaltens bei Kühlung der Oberfläche beobachtet. Unter isothermen Bedingungen lag der KW bei etwa 158° (Abb. 7.39). Von Kühlstufe zu Kühlstufe wurde der Wert nur tendenziell geringer.

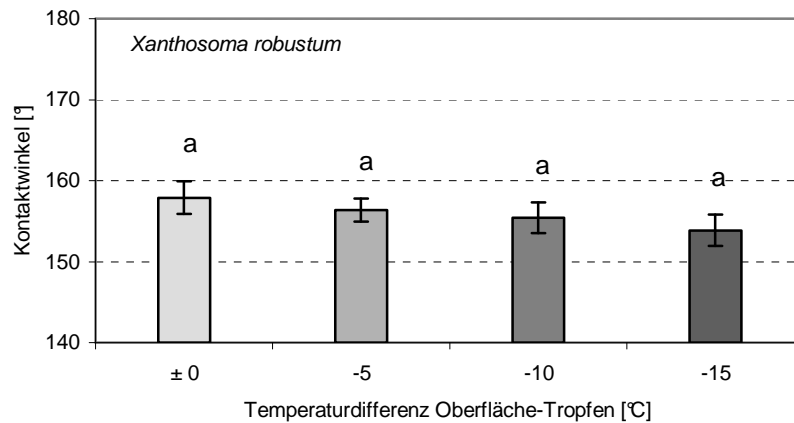


Abb. 7.39: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *X. robustum* Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Bei Kühlung der Oberfläche konnte auch keine Änderung des Abrollwinkels beobachtet werden (Abb. 7.40). Unter isothermen Bedingungen rollte der Glycerintropfen ab einem Neigungswinkel von 4,7° ab.

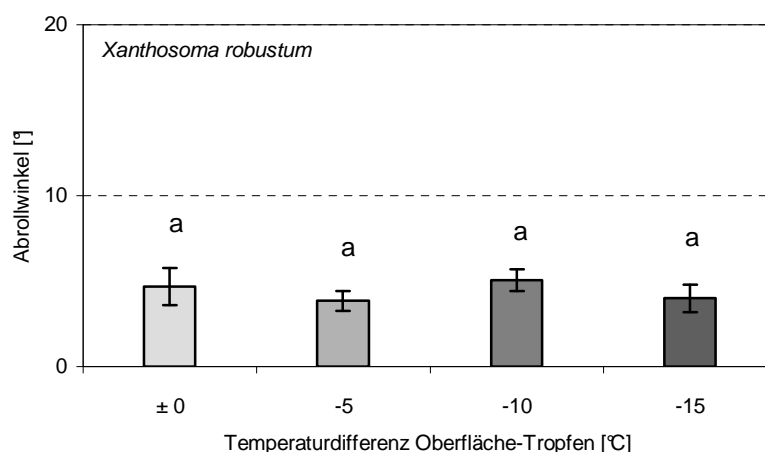


Abb. 7.40: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei *X. robustum*. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Kontaktwinkel von Wasser bei technischen Oberflächen

Circuit foil

Unter isothermen Bedingungen betrug der Kontaktwinkel 163° (Abb. 7.41). Eine Kühlung der Oberfläche führte zu einer Reduktion des KWs. Bereits bei der ersten Kühlstufe fiel der Wert stark ab, es lag jedoch noch kein signifikanter Unterschied vor. Erst bei einer Temperaturdifferenz von -15°C wurde mit 130° ein signifikant geringerer KW gemessen.

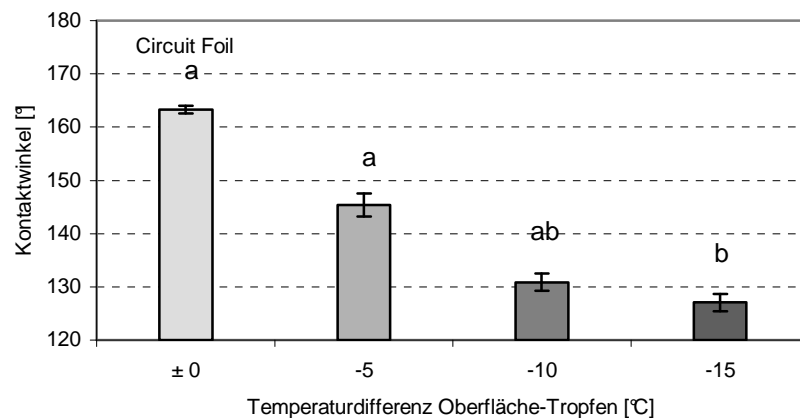


Abb. 7.41: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Circuit Foil. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Bolta Folie

Bei Kühlung der zweiten im Versuch verwendeten Kupferfolie wurde ebenfalls eine Reduktion des Kontaktwinkels registriert (Abb. 7.42). Diese war jedoch deutlich geringer. Von ursprünglich ca. 164° fiel der KW bei Kühlung um -5°C signifikant ab. Eine weitere Kühlung auf $\Delta - 10^\circ\text{C}$ verringerte den KW erneut. Bei der nächsten Kühlstufe konnte keine weitere Veränderung des KWs festgestellt werden.

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

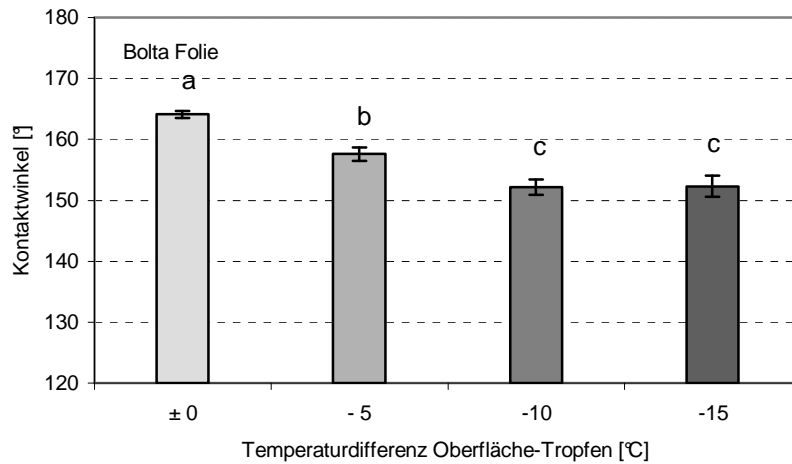


Abb. 7.42: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Bolta Folie. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Creavis-Spray

Der Kontaktwinkel betrug auf der mit Creavis-Spray präparierten Oberfläche unter isothermen Bedingungen etwa 165° (Abb. 7.43). Eine Kühlung der Oberfläche bewirkte eine stufenweise Reduktion des KWs. Bei der höchsten Kühldifferenz von -15°C wurde nur noch ein KW von 151° erreicht.

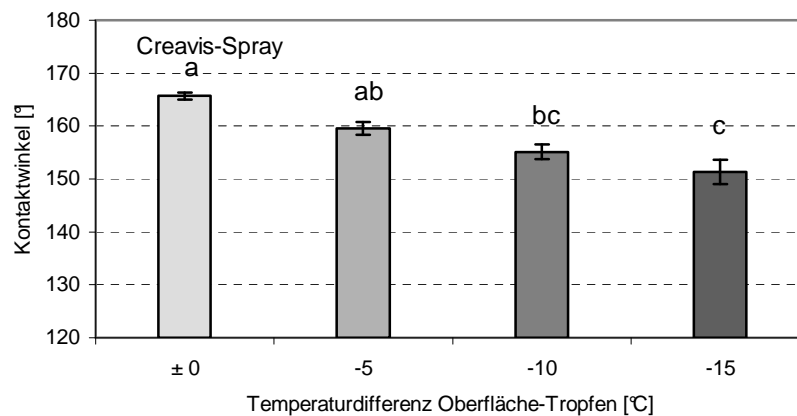


Abb. 7.43: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Creavis-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Mincor®-Spray

Der Gleichgewichtskontaktwinkel auf der mit Mincor-Spray präparierten Oberfläche betrug etwa 163° (Abb. 7.44). Bei Kühlung der Oberfläche fiel dieser Wert stufenweise ab. Während innerhalb der ersten beiden Kühlstufen die Werte nur gering sanken, wurde bei Kühlung um -15°C ein signifikant geringerer KW von ca. 145° gemessen.

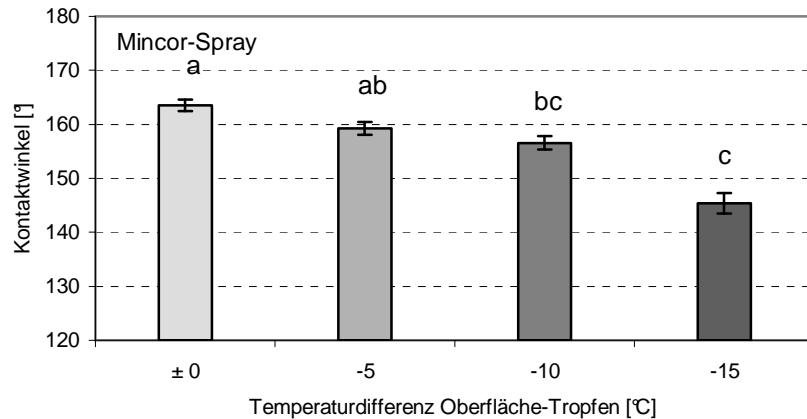


Abb. 7.44: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Mincor-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Abrollwinkel von Wasser bei technischen Oberflächen

Circuit Foil

Bei dieser Kupferfolie lag der AW unter isothermen Bedingungen bei 8,4° (Abb. 7.45). Bereits eine Kühlung der Oberfläche um 5°C führte zu einem deutlichen Anstieg des AWs. Eine weitere Kühlung der Oberfläche ließ die Tropfen an der Oberfläche selbst bei einem Kippwinkel von 90° haften.

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

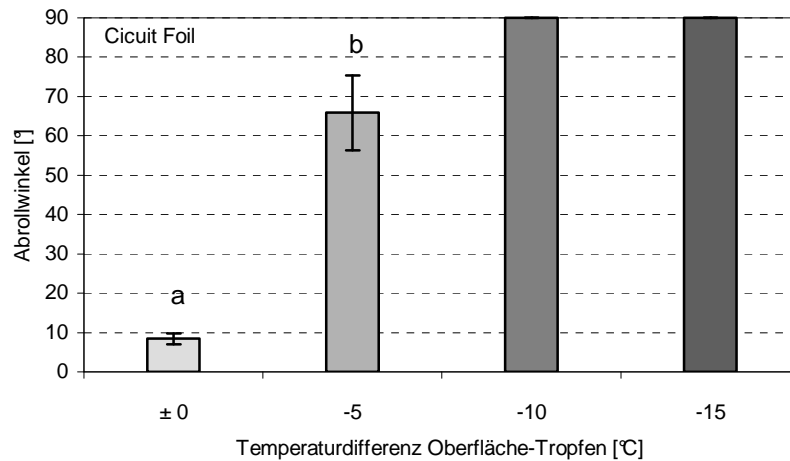


Abb. 7.45: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Circuit Foil. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Bolta Folie

Unter isothermen Bedingungen rollte der Wassertropfen bereits bei extrem niedrigen Neigungswinkeln ab ($1,7^\circ$). Bei Kühlung der Oberfläche stieg der Abrollwinkel jeweils signifikant an, der Wert blieb jedoch selbst bei der größten Temperaturdifferenz unter 11° (Abb. 7.46).

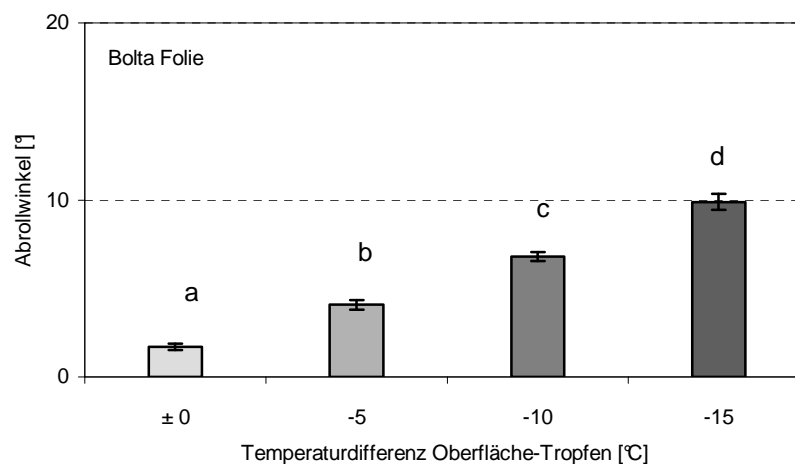


Abb. 7.46: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Bolta Folie. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Creavis-Spray

Die Oberfläche des Creavis-Sprays wies unter isothermen Bedingungen einen sehr geringen Abrollwinkel von nur $0,7^\circ$ auf (Abb. 7.47). Die schrittweise Kühlung der Oberfläche bewirkte einen allmählichen Anstieg des Abrollwinkels auf $\sim 5^\circ$. Signifikant höher als der Ausgangswert waren die Abrollwinkel erst ab Kühlung der Oberfläche um 10°C .

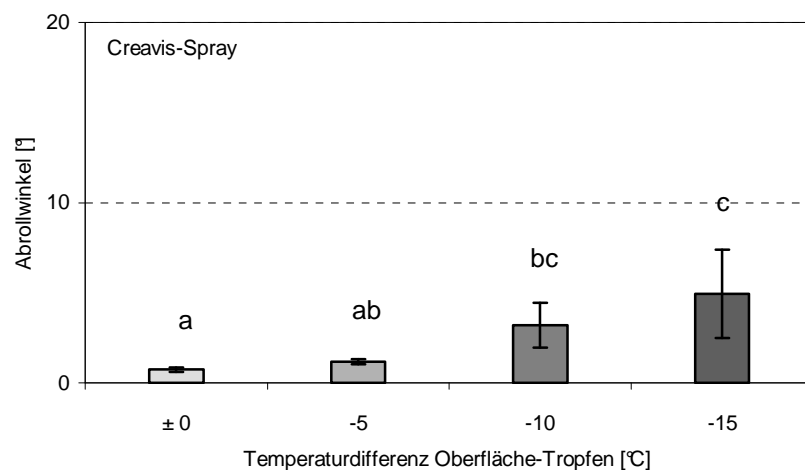


Abb. 7.47: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Creavis-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Mincor®-Spray

Tropfen, die unter isothermen Bedingungen auf der Oberfläche des Mincor-Sprays abgesetzt wurden, rollten bei einer Neigung von durchschnittlich $4,7^\circ$ ab (Abb. 7.48). Eine Kühlung bewirkte einen signifikanten stufenweisen Anstieg des AWs. Bei $\Delta-15^\circ\text{C}$ betrug der Wert über 30° .

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

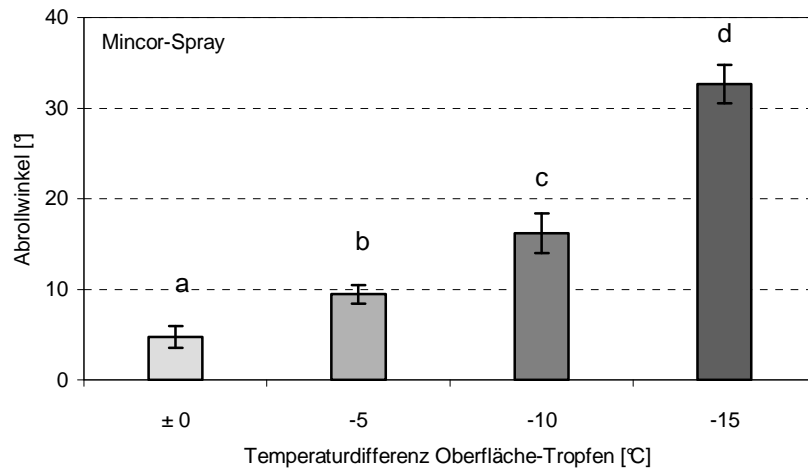


Abb. 7.48: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Mincor-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Einfluss der Oberflächentemperatur auf Kontakt- und Abrollwinkel von Glycerin bei technischen Oberflächen

Circuit Foil

Der Kontaktwinkel von Glycerin auf der Circuit Foil Oberfläche betrug unter isothermen Bedingungen $\sim 162^\circ$ (Abb. 7.49). Bei Kühlung der Oberfläche fand keine Änderung statt.

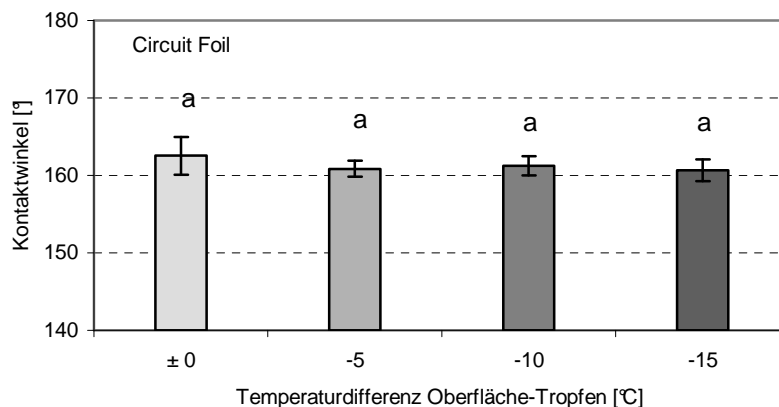


Abb. 7.49: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Circuit Foil. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Der Abrollwinkel von Glycerin auf Circuit Foil war unter isothermen Bedingungen sehr gering und lag bei $5,3^\circ$ (Abb. 7.50). Eine Kühlung der Oberfläche um 5°C bewirkte ein signifikantes Ansteigen des AWs. In den darauf folgenden Kühlstufen sank der AW wieder leicht ab, so dass kein signifikanter Unterschied zum Ausgangswert mehr vorlag.

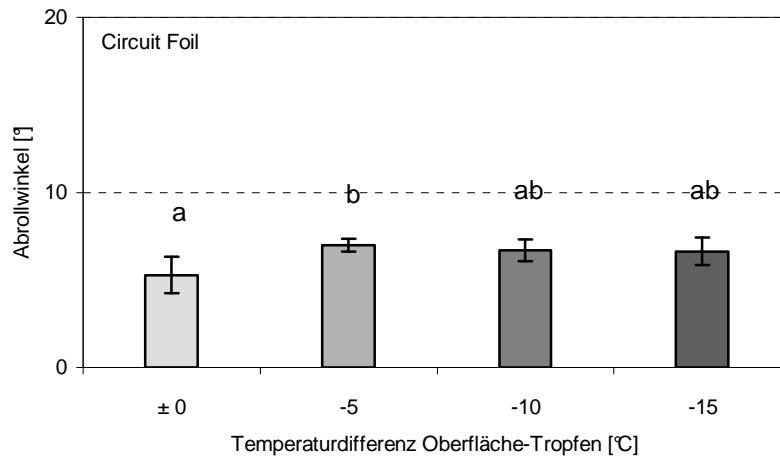


Abb. 7.50: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Circuit Foil. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Bolta Folie

Der Kontaktwinkel von Glycerin auf Bolta Folie lag bei 162° (Abb. 7.51). Eine Kühlung der Oberfläche bewirkte eine leichte Verringerung des KWs, die ab der zweiten Kühlstufe ($\Delta-10^\circ\text{C}$) signifikant war. Der Wert fiel um ca. 2° ab.

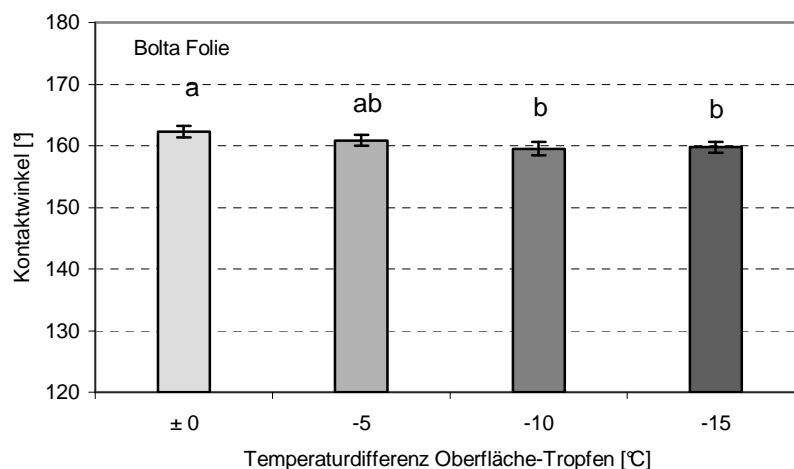


Abb. 7.51: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Bolta Folie. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Unter isothermen Bedingungen rollten die Tropfen auf der Bolta Folie bereits bei einem Neigungswinkel von $\sim 2^\circ$ ab (Abb. 7.52). Eine Kühlung der Oberfläche um 5°C bewirkte zunächst keine Änderung des AWs. Erst ab einer Differenz von 10°C nahm der AW signifikant zu. Eine stärkere Kühlung bewirkte keine weitere Änderung.

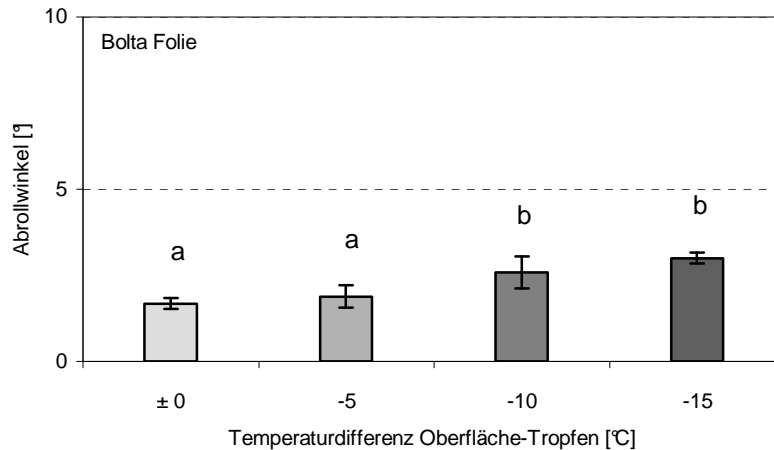


Abb. 7.52: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Bolta Folie. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Creavis-Spray

Die mit Creavis-Spray präparierte Oberfläche war mit Glycerin kaum benetzbar (Abb. 7.53). Unter isothermen Bedingungen wurde ein Kontaktwinkel von ca. 162° gemessen. Eine Kühlung, selbst um 15°C , bewirkte nur eine tendenzielle Verringerung des KWs.

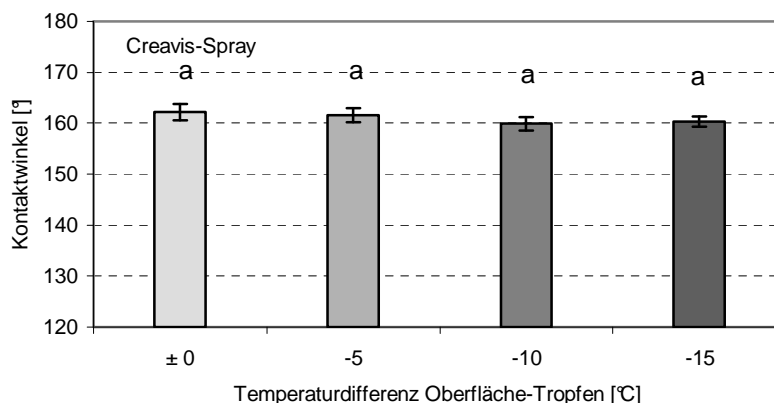


Abb. 7.53: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Creavis-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Auch der Abrollwinkel änderte sich bei Kühlung der Oberfläche nicht (Abb. 7.54). Ohne Kühlung rollte Glycerin bei einem Neigungswinkel von 2° ab. Bei allen Kühlstufen blieb dieser Wert konstant.

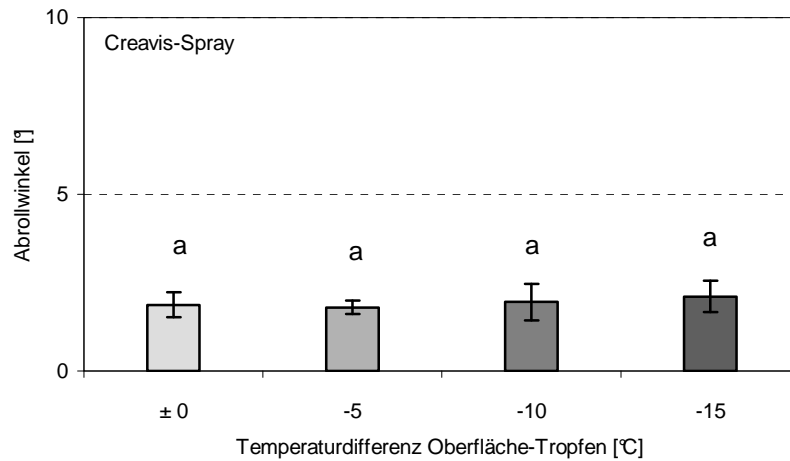


Abb. 7.54: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Creavis-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Mincor®-Spray

Auch diese Oberfläche erwies sich gegenüber Glycerin als unbenetzbar (Abb. 7.55). Der Kontaktwinkel betrug unter isothermen Bedingungen $\sim 161^\circ$. Bei Kühlung der Oberfläche sank dieser Wert von einer Kühlstufe zur nächsten tendenziell, jedoch nicht signifikant ab. Bei $\Delta -15^\circ\text{C}$ lag der Kontaktwinkel nur $1,4^\circ$ unterhalb des ursprünglichen Kontaktwinkels.

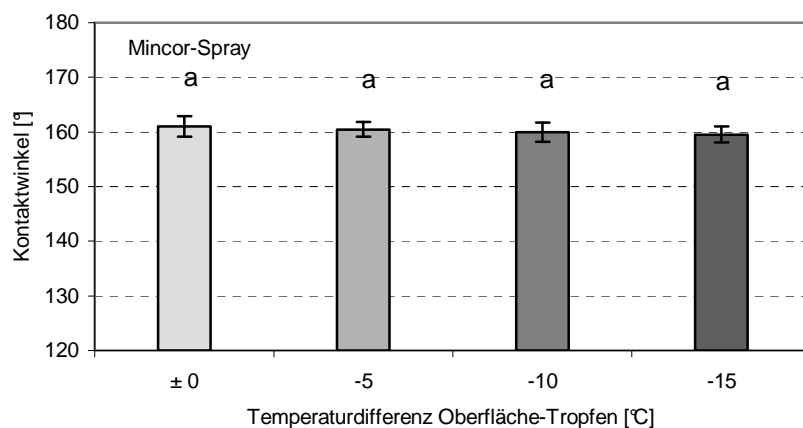


Abb. 7.55: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Mincor-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Der Abrollwinkel von Glycerin war auf der Mincor-Oberfläche wesentlich höher als bei den übrigen technischen Oberflächen (Abb. 7.56). Bereits unter isothermen Bedingungen rollte der Tropfen erst bei einer Neigung der Oberfläche von ca. 23° ab. Eine Änderung des Abrollwinkels bei Kühlung der Oberfläche wurde nicht nachgewiesen.

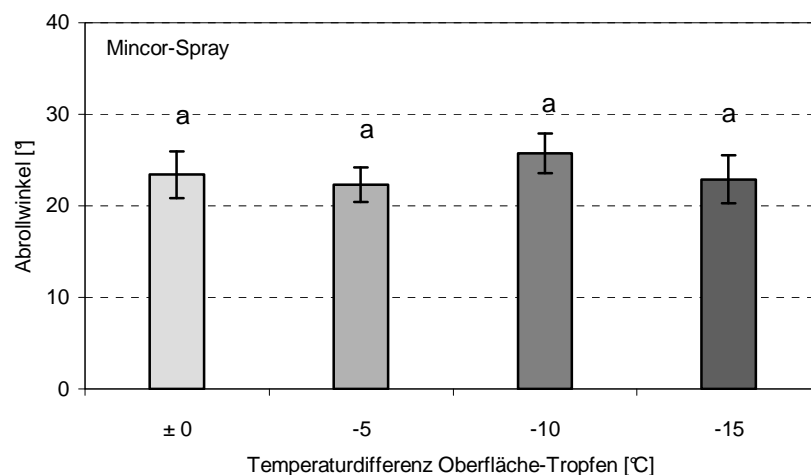


Abb. 7.56: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Mincor-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*

Kontaktwinkeländerung auf gekühlten Oberflächen in Abhängigkeit der Zeit

Die bisherigen Untersuchungen zeigten lediglich eine Momentaufnahme der Kontakt- und Abrollwinkel bei Kühlung der Oberflächen. Unklar ist jedoch, in wieweit sich die Änderungen mit der Dauer des Kontakts zwischen Tropfen und Oberfläche fortsetzen. In dieser Untersuchung wurden deshalb an ausgesuchten Oberflächen die Kontaktwinkel im Verlauf der Zeit gemessen. Die Temperatur des auf der Oberfläche ruhenden Tropfens wurde dabei mittels Thermographie kontaktlos erfasst. Da eine kontinuierliche Abrollwinkelmessung in Abhängigkeit der Verweildauer apparativ nicht durchführbar war, konzentrierte sich diese Untersuchung ausschließlich auf die Kontaktwinkel.

* Daten aus der Diplomarbeit von Bernd Mockenhaupt (2003): Pflanzliche superhydrophobe Oberflächen: Physikalische Einflüsse auf ihre Benetzbarkeit im Vergleich mit technischen Oberflächen

Änderung der Kontaktwinkel und der Tropfentemperatur bei *Colocasia esculenta*

Auf einer um 15°C kühleren *C. esculenta*-Oberfläche änderte sich der KW nach fast 3 Minuten Verweildauer des Tropfens um ca. 10° (Abb. 7.57). Stärkste Änderung fand innerhalb der ersten 50s statt, danach sank der Wert kaum noch. Die Werte blieben über die gesamte Versuchsdauer oberhalb von 150° .

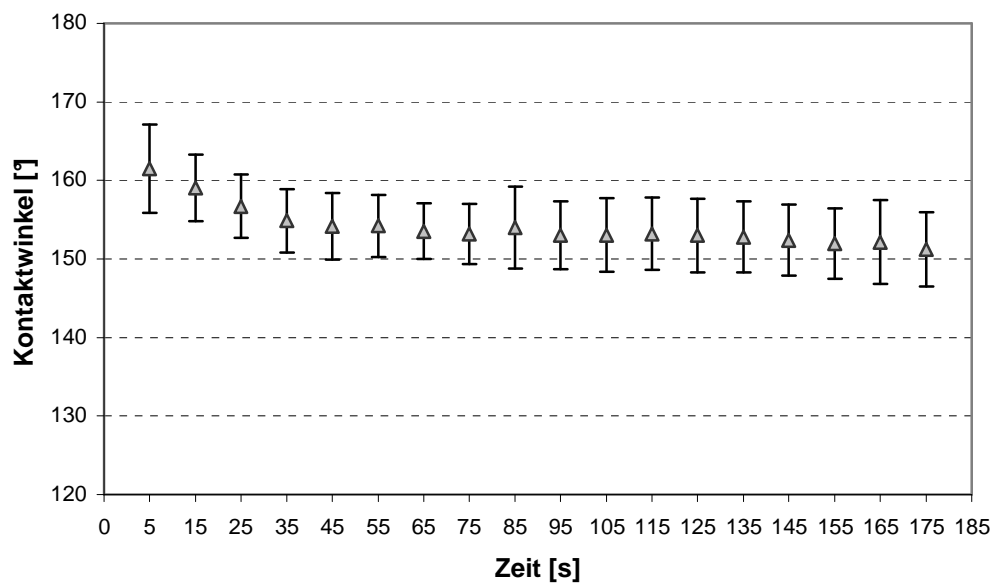


Abb. 7.57: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf *C. esculenta* bei Kühlung um 15°C im Verlauf der Zeit. Mittelwerte aus sieben (nach 5 s) bzw. 10 Parallelen mit einfacher Standardabweichung

Die thermographische Messung eines abgesetzten Tropfens auf der Oberfläche von *C. esculenta* zeigte, dass sich dessen Temperatur schnell der Oberflächentemperatur ($\Delta 15^{\circ}\text{C}$) anpasste. Während des fast 60-sekündigen Messzeitraums nahm die Temperatur des Tropfens um ca. 12°C ab (Abb. 7.58). Zunächst war der Tropfen deutlich wärmer als die Oberfläche (Abb. 7.59a). Nach 58s war kein Unterschied zwischen der Temperatur des Tropfens und der Oberfläche mehr zu erkennen (Abb. 7.59c).

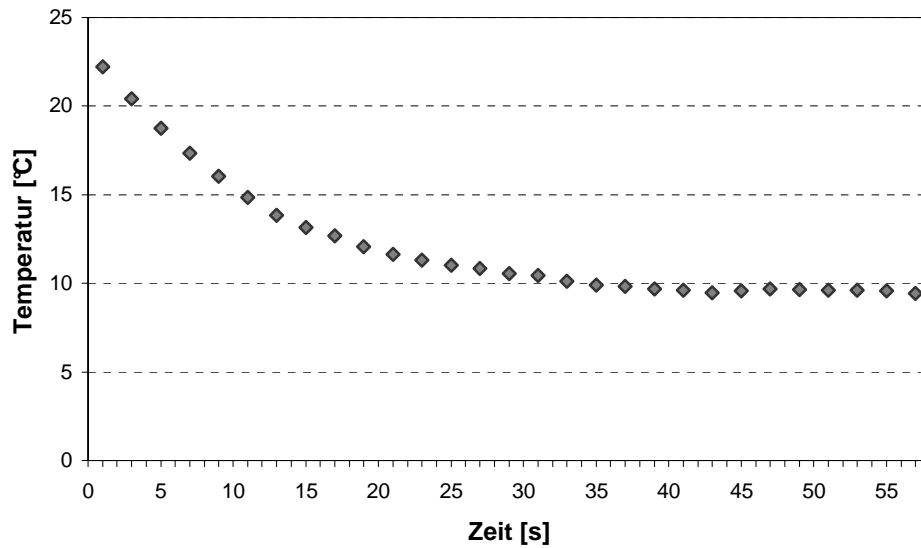


Abb. 7.58: Änderung der Tropfentemperatur auf *C. esculenta* im Verlauf der Zeit

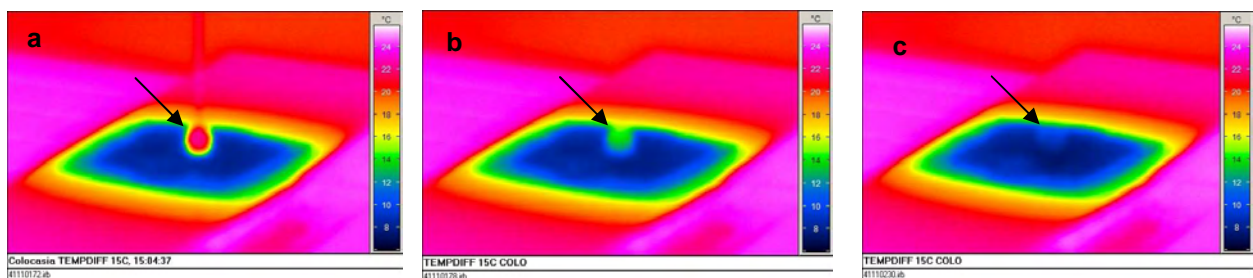


Abb. 7.59: Thermographisches Bild eines Tropfens (Pfeil) auf der gekühlten Oberfläche von *C. esculenta* (a=0 s; b=6 s; c=58 s)

Änderung der Kontaktwinkel und der Tropfentemperatur bei *Alocasia macrorrhiza*

Bei *A. macrorrhiza* wurde bei zwei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen über einen Zeitraum von 10 Minuten der Kontaktwinkel beobachtet. Auch in diesem Fall wurde eine deutliche Absenkung des KWs sowohl bei einer Temperaturdifferenz von -5°C wie auch bei -15°C gemessen (Abb. 7.60). Die Änderung fiel umso stärker aus, je größer die Temperaturdifferenz war. Bei -5°C Differenz wurde betrug die Abnahme über die Zeit ca. 10° , bei -15°C ca. 25° . Bei beiden Temperaturdifferenzen fand die stärkste Änderung innerhalb der ersten 60 Sekunden statt. Während ein weiteres Absinken des KWs bei der Temperaturdifferenz von $\Delta-5^{\circ}\text{C}$ nach dieser Zeitspanne nicht mehr erfolgte und der Wert fast konstant blieb, verringerte sich der KW bei $\Delta-15^{\circ}\text{C}$ noch weiter. Erst

nach ca. 5 Minuten bleib auch hier der Wert bis zum Ende der Messung nahezu unverändert.

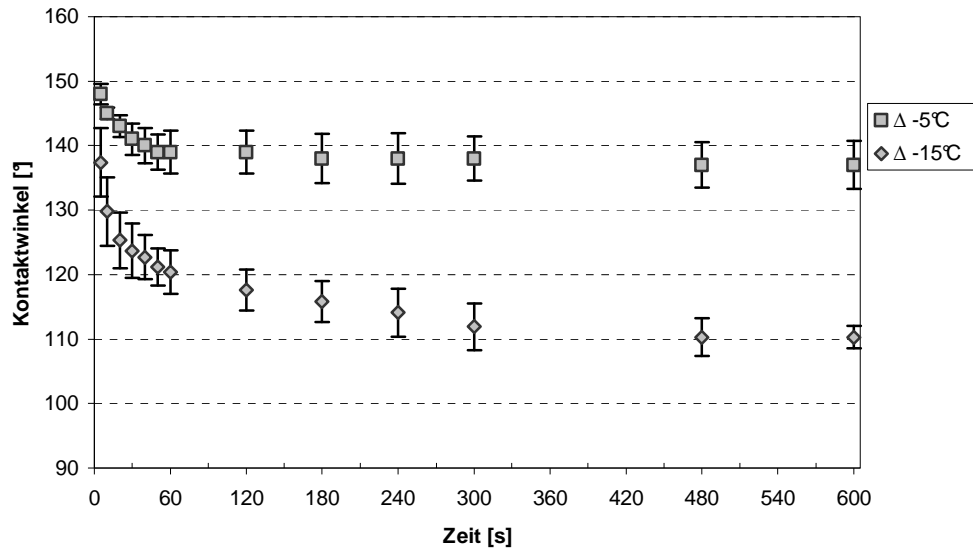


Abb. 7.60: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf *A. macrorrhiza* im Verlauf der Zeit. Mittelwerte aus sieben ($\Delta -5^{\circ}\text{C}$) bzw. neun ($\Delta -15^{\circ}\text{C}$) Parallelen mit einfacher Standardabweichung

Die Temperaturdifferenz zwischen Tropfen und Oberfläche war in beiden Versuchsreihen nach kurzer Zeit ausgeglichen (Abb. 7.61). Bei einer Temperaturdifferenz von -5°C nahm der Tropfen nach ca. 50 Sekunden die Temperatur der Blattoberfläche an (ca. 17°C). Bei der größeren Temperaturdifferenz von -15°C dauerte es mit ca. 60 Sekunden etwas länger.

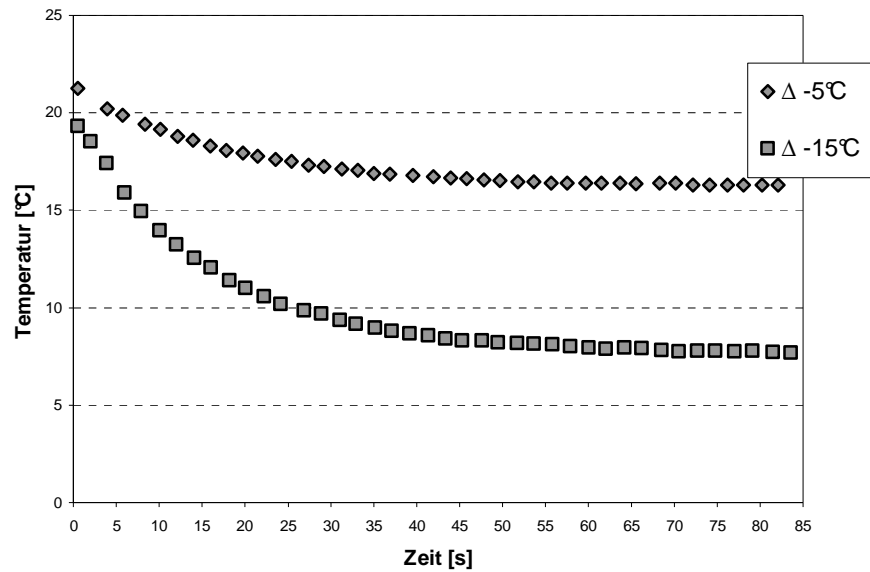


Abb. 7.61: Änderung der Tropfentemperatur auf einer um 5°C und 15°C kühleren Oberfläche von *A. macrorrhiza* im Verlauf der Zeit

In den thermographischen Aufnahmen war deutlich die Anpassung der Tropfentemperatur an die Oberflächentemperatur zu erkennen (Abb. 7.62 u. 7.63). Während der Tropfen auf der Blattoberfläche bei Δ -15°C wegen der Temperaturanpassung nach ca. 42 Sekunden im Bild nicht mehr zu erkennen war (Abb. 7.63c), konnte der Tropfen bei Δ -5°C nach 40 Sekunden noch deutlich ausgemacht werden (Abb. 7.62c). Der Farbgebung nach lag die Tropfentemperatur unterhalb der der Oberfläche. Gemäß der Kontrolle der Oberflächentemperatur mittels des Thermoelements war jedoch kein Temperaturunterschied zwischen Tropfen und Oberfläche vorhanden.

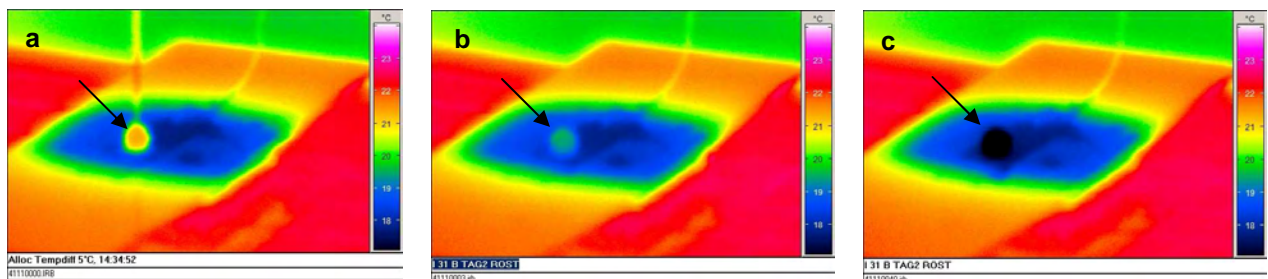


Abb. 7.62: Thermographisches Bild eines Tropfens (Pfeil) auf der um 5°C kühleren Oberfläche von *A. macrorrhiza* (a=0 s; b=3 s; c=40 s)

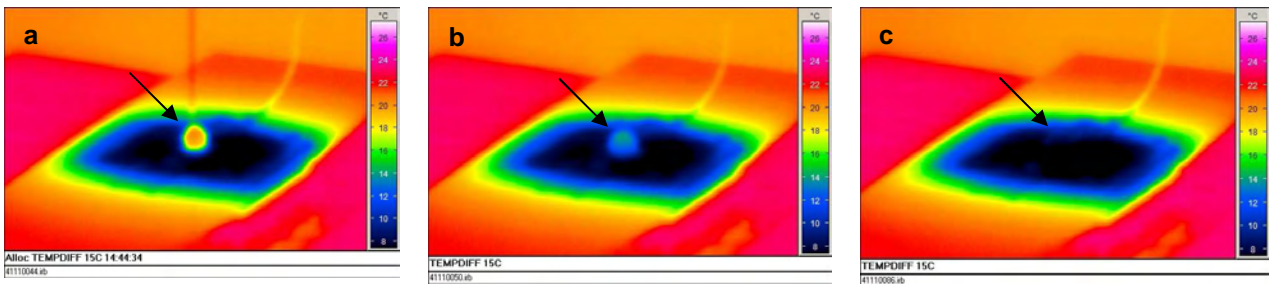


Abb. 7.63: Thermographisches Bild eines Tropfens (Pfeil) auf der um 15°C kühleren Oberfläche von *A. macrorrhiza* (a=0 s; b=6 s; c=42 s)

Änderung der Kontaktwinkel und der Tropfentemperatur bei Bolta-Folie

Auf Bolta-Folie fiel der KW innerhalb von fast drei Minuten nur um ca. 8° (Abb. 7.64). Die stärkste Abnahme fand innerhalb der ersten 30 Sekunden statt. Danach änderte sich der KW nicht mehr. Auffällig war die starke Streuung der Messwerte.

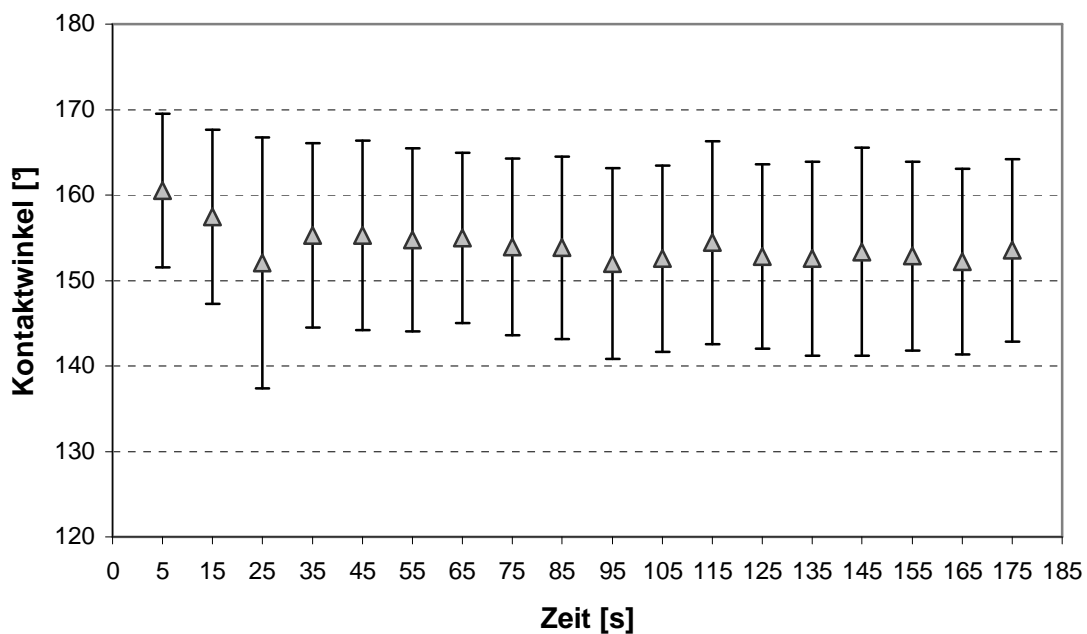


Abb. 7.64: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf Bolta Folie im Verlauf der Zeit. Mittelwerte aus 10 Parallelen mit einfacher Standardabweichung

In der thermographischen Messung konnte ein schneller Abfall der Tropfentemperatur beobachtet werden. Erneut fand eine Temperaturangleichung zwischen Tropfen und Oberfläche statt (Abb. 7.65). Auch in diesem Fall wurde die stärkste Änderung innerhalb

der ersten 50 Sekunden verzeichnet. Im weiteren Verlauf der Messung änderte sich die Tropfentemperatur nicht mehr.

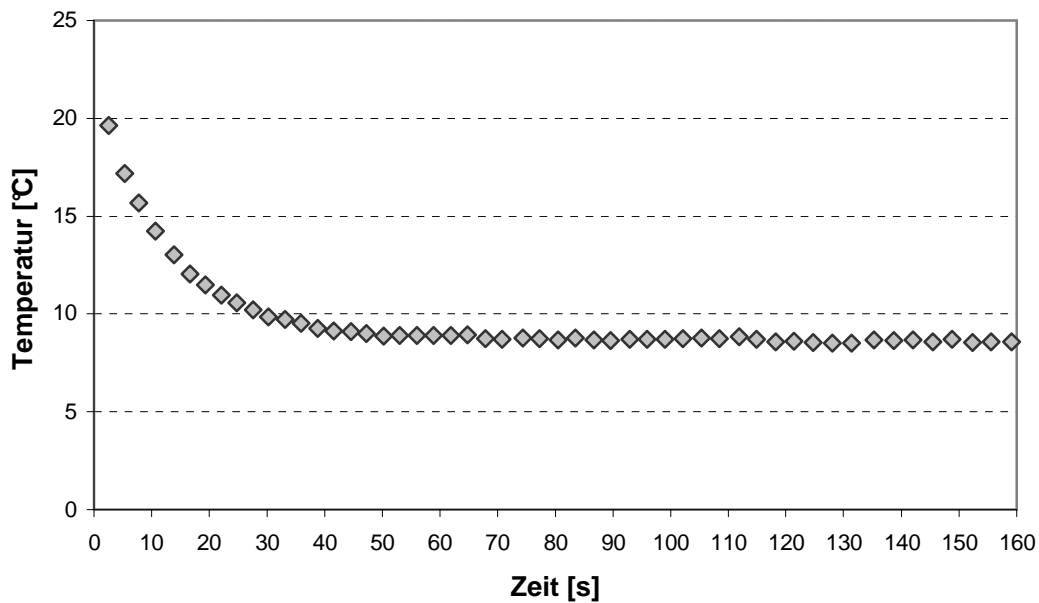


Abb. 7.65: Änderung der Tropfentemperatur auf einer um 15°C kühleren Oberfläche von Bolta Folie im Verlauf der Zeit

Im thermographischen Bild war das Abkühlen des Tropfens gut zu beobachten (Abb. 7.66a-c). Im Bild war auch deutlich ein Unterschied zwischen dem Peltier-Element (dunkelblau) und der Bolta-Oberfläche (grün) zu erkennen. Dies impliziert, dass die Bolta Folie eine höhere Temperatur aufwies als das darunterliegende Thermoelement. Dieser Unterschied konnte in der Temperaturregelung (s. Kap. 7.1 Vorrichtung zur Regelung der Oberflächen-Temperatur) jedoch nicht ausgemacht werden. Im thermographischen Bild erschien die Oberfläche wegen anderer Emissionseigenschaften wärmer als sie tatsächlich war.

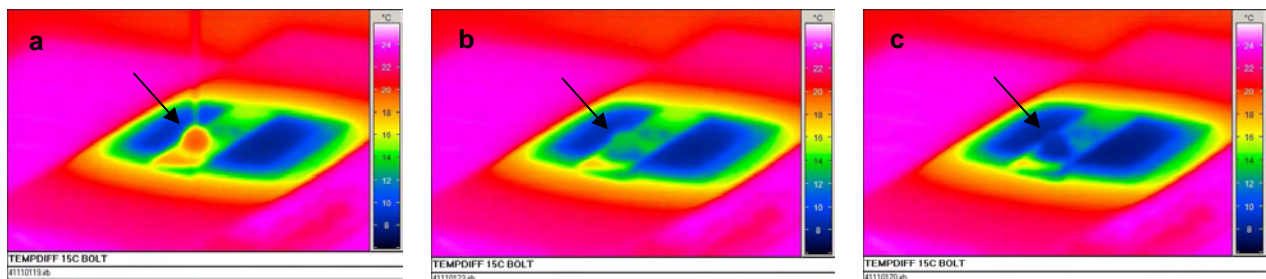


Abb. 7.66: Thermographisches Bild eines Tropfens (Pfeil) auf der um 15°C kühleren Oberfläche von Bolta-Folie (a=0 s; b=4 s; c=51 s)

7.3 Diskussion

Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf gekühlten pflanzlichen Oberflächen

Insgesamt betrachtet führte eine Kühlung der pflanzlichen Oberflächen in den meisten Fällen zu einer signifikanten oder tendenziellen Verringerung des Kontaktwinkels. Bereits mit dem bloßen Auge konnte bei Kühlung Kondensation von Wasser an der Oberfläche beobachtet werden. Diese trat besonders in der unmittelbaren Umgebung und unterhalb des Tropfens auf (Abb. 7.67). Eine Auswirkung der Kondensation auf den Kontaktwinkel wiesen bereits Lafuma & Quéré (2003) bei technischen, geometrisch strukturierten unbenetzbaren Oberflächen nach. Sie zeigten, dass Kondensation zur Umwandlung des Cassie-Zustands in den Wenzel-Benetzungszustand führt. Im Wenzel-Zustand wird der Kontaktwinkel durch die Vergrößerung der benetzten Fläche bedingt (Gl. 1.2), die Oberflächenrauigkeit wird dabei zum maßgeblichen Faktor des Kontaktwinkels. Je rauer die Oberfläche dabei ist, desto höher ist der entsprechende Kontaktwinkel.

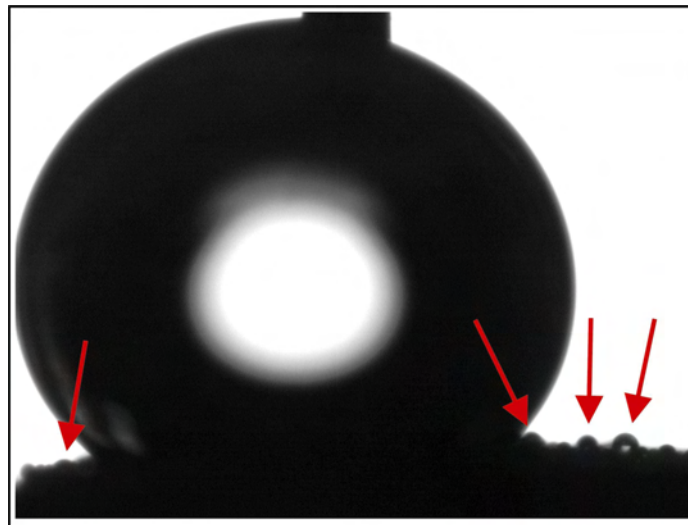


Abb. 7.67: Kondensationstropfen (Pfeile) in der unmittelbaren Umgebung eines abgesetzten Tropfens bei Kühlung der Oberfläche um -15°C , beobachtet auf *Brassica oleracea*

Diese Beobachtung wurde auch von Narhe & Beysens (2004) zunächst für Siliziumoberflächen mit parallel angeordneten Rillen gemacht. Ähnliche Versuche zur Kondensation auf superhydrophoben, geometrisch strukturierten (gitterartig angeordnete, dreieckige Spitzen) Oberflächen bestätigen den von ihnen beobachteten Effekt der sinkenden Kontaktwinkel (Narhe & Beysens, 2006). Ebenfalls auf geometrisch strukturierten Siliziumoberflächen, bestehend aus mikroskopisch kleinen Säulen unterschiedlichen Querschnitts, untersuchten Wier & McCarthy (2006) die

Kondensation. Auch sie konnten beobachten, dass in den Zwischenräumen der Strukturen bei Kondensation Tröpfchenbildung stattfand und davon der makroskopische Kontaktwinkel beeinflusst wurde.

Während bei den bisher publizierten Arbeiten zur Kondensation auf superhydrophoben Oberflächen in allen Fällen eine Umwandlung des Cassie-Zustands in den Wenzel-Zustand erfolgte, wirkte sich in der vorliegenden Untersuchung die Kondensation je nach Oberfläche unterschiedlich aus. In manchen Fällen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen dem Kontaktwinkel unter isothermen Bedingungen und dem bei Kühlung gemessen werden. Über solche Oberflächen wurde bislang noch nicht berichtet. Geringe Änderungen der KWs wurden aber theoretisch für pflanzliche Oberflächen von Lafuma & Quéré (2003) vorhergesagt. Doppeltstrukturierte pflanzliche Oberflächen sollen demnach weniger anfällig gegenüber Kondensation sein als einfach strukturierte. Diese Theorie konnte in der vorliegenden Arbeit nur teilweise bestätigt werden. Auf *N. nucifera*, das über eine doppeltstrukturierte Oberfläche verfügt, wurde keine signifikante Änderung des KWs gemessen. Dieses Ergebnis steht aber im Widerspruch zu den Untersuchungen von Cheng & Rodak (2005). Sie beschrieben für *N. nucifera* unter Kondensationsbedingungen drei verschiedene Benetzungszustände:

- i Keine Änderung der Unbenetzbarkeit.
- ii Wasser verbleibt auf der Oberfläche, bildet aber hohe Kontaktwinkel.
- iii Wasser benetzt vollständig die Oberfläche.

Eine Änderung der Unbenetzbarkeit wie von (Cheng & Rodak, 2005; Cheng *et al.*, 2005) beobachtet, konnte bei keiner der hier durchgeführten Untersuchungen festgestellt werden. Eine mögliche Ursache für die differierenden Ergebnisse könnte im Versuchsaufbau liegen. Die Autoren platzierten ein Lotusblatt oberhalb eines Topfes mit kochendem Wasser und kühlten dabei die Rückseite des Blattes mit Eis, damit eine Zerstörung der Oberfläche durch den heißen Wasserdampf verhindert wird. Bei diesem Aufbau kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Zerstörung der hitzeempfindlichen Wachse stattgefunden hat. Die Schmelzpunkte von pflanzlichen Wachsen liegen typischerweise im Bereich von 65°C-80°C (Ensikat *et al.*, 2006), für die Wachse von *N. nucifera* wurde ein Schmelzpunkt von 90°C-95°C ausgemacht. Da die Blätter von *N. nucifera* viele Luft gefüllte Räume in den Intrazellularen besitzen (Aerenchym) und große weitlumige Zellen im Mesophyll aufweisen (Vogel, 2004), kann davon ausgegangen werden, dass eine gute thermische Isolation vorliegt. Ein Anschmelzen der Wachse wäre deshalb trotz Kühlung der Blattunterseite durchaus möglich gewesen.

Zudem sind Wachse generell gegenüber Wasserdampf empfindlich, wie bereits Untersuchungen von (Neinhuis *et al.*, 1994) zeigen konnten. Möglicherweise wurde die Änderung der Benetzbarkeit, welche von Cheng & Rodak (2005) beobachtet wurde, durch eine Zerstörung der Wachse hervorgerufen. Die Autoren gaben an, dass die Oberfläche nach den Versuchen im REM kontrolliert wurde und die Wachse intakt waren, es fehlt jedoch die Angabe, wie kurz nach der Untersuchung die Kontrolle durchgeführt wurde. Aus Rekristallisationsversuchen von epikutikularen Wachsen ist bekannt, dass self-assembly Prozesse bei der Röhrenbildung vorliegen (Koch *et al.*, 2006a). Bereits einige Stunden später hätten demnach wieder intakte Röhrenwachse bei *N. nucifera* vorliegen können, ohne dass die vorherige Zerstörung hätte erkannt werden können. Letztlich könnte nur eine Wiederholung der Untersuchungen von Cheng Rodak (2005) Klarheit über die Intaktheit der Wachse schaffen.

Dass die Änderung der KW nur wenig von der Oberflächenstruktur abhängt konnte besonders bei *T. flavum* gezeigt werden. Hier wurde ein sehr geringer Unterschied zwischen dem Kontaktwinkel unter isothermen Bedingungen und bei Kühlung (Δ -15°C) gemessen ($\Delta < 10^\circ$). Die Oberfläche von *T. flavum* besitzt zwar konvexe Zellen und ist zusammen mit den epikutikularen Wachsen damit ebenfalls doppelstrukturiert, jedoch ist der hierarchische Aufbau bedingt durch Zellpapillen nicht mit dem von *N. nucifera* zu vergleichen (vgl. Bildtafeln 9 & 10; 8). Oberflächen die ähnlich wie die *N. nucifera* strukturiert sind, beispielsweise *C. esculenta* oder *X. robustum*, zeigten dagegen deutlich stärkere Auswirkung der Kondensation auf den KW. Dabei war diese ähnlich stark wie bei weniger hierarchisch aufgebauten Oberflächen (z.B. *H. halodendron*, *T. majus* oder *C. japonicum*).

Dieses Ergebnis unterstreicht die Forderung von Chen *et al.* (1999), dass zur Beschreibung der Unbenetzbarkeit einer Oberfläche nicht ausschließlich der KW angegeben werden sollte. Vielmehr sagen dynamische Meßmethoden wie Abrollwinkel- oder Fortschritt- und Rückschreitwinkelmessung mehr über das Benetzungsverhalten aus.

Eine starke Differenz der Kontaktwinkel wurde bei *A. macrorrhiza* und *B. oleracea* gefunden. Bei beiden wurde durch die Kühlung sogar der Grenzkontaktwinkel für superhydrophobe Oberflächen von 140° unterschritten. Überraschenderweise handelt es sich um sehr unterschiedliche Oberflächen. *A. macrorrhiza* weist Papillen auf, die zusätzlich mit Kutikularfaltungen überzogen sind (vgl. Bildtafel 3). Auf der gesamten Oberfläche sind zudem zwischen den Kutikularfalten ebene, unstrukturierte Flächen zu

erkennen. Die Kutikularfalten erreichen nicht die Feinheit von Wachskristallen. Es ist deshalb anzunehmen, dass eine solche Oberfläche besonders gut von Wasser nachgezeichnet werden kann und somit für den Übergang in den Wenzel-Benetzungszustand besonders empfindlich ist. Der Grad der Rauigkeit dürfte deutlich geringer sein als bei Oberflächen mit Wachskristallen, so dass daraus nur ein geringer Wenzel-Kontaktwinkel resultiert.

Der Aufbau der Oberfläche von *B. oleracea* ist nicht zu vergleichen mit dem von *A. macrorrhiza*, so dass der ebenfalls geringe KW bei Kühlung unerwartet war. Bei *B. oleracea* ist die Oberfläche verhältnismäßig flach, dafür aber vollständig mit feinen Wachskristallen (Wachsröhrchen, die zum Teil flach aufliegend und terminal, dendritisch verzweigt sind) überzogen (vgl. Bildtafeln 5 & 6). Zwei Ursachen könnten die starke Veränderung des KWs bei Kühlung hervorrufen. Die Wachskristalle bedingen eine verhältnismäßig geringe Rauigkeit, wodurch der Wenzel-Kontaktwinkel deutlich niedriger ausfällt. Denkbar ist jedoch auch eine Veränderung der Wachskristalle bei Kondensation, da aus der Literatur eine erhöhte Empfindlichkeit der Wachse von *B. oleracea* gegenüber Wasser beschrieben ist (Koch *et al.*, 2004). Eine Erhöhung der Benetzbarkeit wäre dann auf eine Strukturveränderung zurückzuführen, nicht jedoch auf das Überführen von heterogener (Cassie) zu homogener (Wenzel) Benetzung.

Änderung des Abrollwinkels von Wasser auf gekühlten pflanzlichen Oberflächen

Generell fand unter Kondensationsbedingungen bei den meisten Oberflächen eine Änderung des Abrollwinkels statt. Die Kondensation wirkte sich somit stärker auf den Abroll- als auf den Kontaktwinkel aus. Dies wurde erstmals von Lafuma & Quéré (2003) vorhergesagt und experimentell für eine geometrisch strukturierte Oberfläche nachgewiesen. Wier & McCarthy (2006) bestätigten diesen Effekt für weitere geometrisch strukturierte Oberflächen. Dass im Wenzel-Zustand eine teilweise dramatische Erhöhung der adhäsiven Eigenschaften von Tropfen vorliegt, belegen inzwischen zahlreiche Publikationen (bsp. Quéré *et al.*, 2003; Ren *et al.*, 2002). Die Kondensation führt dazu, dass die Zwischenräume der Strukturen mit Wasser angefüllt werden. In diesem Zustand ist mehr Energie notwendig, um den Tropfen auf der Oberfläche zu bewegen. Der Tropfen bleibt an der Oberfläche selbst bei Kippung um 180° hängen. Dies ist einer der Gründe, warum bereits 1999 Chen *et al.* (1999) vorschlugen, nicht nur den Kontaktwinkel, sondern auch die Hysterese zur Beschreibung der Unbenetzbarkeit anzugeben. Die vorliegende Untersuchung bestätigt

die Forderung von Chen *et al.* (1999), da bei einigen Oberflächen trotz sehr hoher KWs kein Abrollen der Tropfen mehr erfolgte (z.B. *A. aurantiaca*, *A. cannabinum*, *S. vulgaris*).

Wier & McCarthy (2006) empfehlen, unter Kondensationsbedingungen keine superhydrophoben Oberflächen zu verwenden. Sie schlagen vor auf glatte, hydrophile Oberflächen zurückzugreifen, da sich die adhäsiven Eigenschaften von Wasser bei diesen Oberflächen nicht ändern. Wier & McCarthy (2006) gehen wie andere Autoren davon aus, dass superhydrophobe Eigenschaften unter Kondensationsbedingungen immer verloren gehen. In der vorliegenden Arbeit konnte jedoch erstmals gezeigt werden, dass je nach Oberfläche der Einfluss der Kondensation auf den Abrollwinkel gering ist oder sogar überhaupt keine Rolle spielt. Beispiele dafür waren *X. robustum*, *C. esculenta* oder *N. nucifera*.

Am wenigsten wirkte sich die Kondensation bei *N. nucifera* aus, hier wurde keine Änderung der unbenetzbaren Eigenschaften registriert. Dieses Ergebnis widerspricht den Untersuchungen von Cheng & Rodak (2005), die bei Lotus nach Kondensation über Tropfen berichten, die selbst bei 90° Kippwinkel nicht mehr abrollten. Mögliche Gründe für die konträren Ergebnisse wurden bereits bei der Diskussion über den Einfluss auf den Kontaktwinkel besprochen (Kap. Änderung des Kontaktwinkels auf gekühlten pflanzlichen Oberflächen), die Ursache könnte auch hier in einer Zerstörung der Röhrenchenwachse liegen.

N. nucifera, *X. robustum* und *C. esculenta* verfügen über die Gemeinsamkeit einer stark ausgeprägten Doppelstruktur. Sie besitzen Zellpapillen, die zusätzlich mit feinen Wachskristallen überzogen sind. Wie wichtig die Doppelstruktur für das dynamische Verhalten von Wassertropfen ist, diskutieren Zhu *et al.* (2005a) für geometrisch strukturierte Oberflächen. Die Autoren konnten zeigen, dass hauptsächlich der Abrollwinkel und nicht der Kontaktwinkel von den Doppelstrukturen beeinflusst wird. Es ist davon auszugehen, dass wie von Lafuma & Quéré (2003) vorhergesagt, ein Überführen in den Wenzel-Zustand bei solchen doppelstrukturierten Oberflächen schwer ist und möglicherweise der Cassie-Kontaktwinkel energetisch bevorzugt wird (Patankar, 2004b). Die Doppelstrukturen haben mehrere Auswirkungen. Zum einen destabilisieren sie die Dreiphasenkontaktlinie wie von (Öner & McCarthy, 2000) für das Abrollverhalten gefordert, gleichzeitig stabilisiert die Form der Papillen den Cassie-Zustand (Patankar, 2004b). Die Oberflächen dieser Pflanzen stellen damit die idealen Vorbilder für technische Oberflächen dar.

Die durch Kondensation bedingte Erhöhung der Abrollwinkel folgt je nach Oberfläche einem anderen Schema. Bei *A. macrorrhiza*, *S. vulgaris*, *A. cannabinum* und *B. oleracea* stieg der Abrollwinkel hauptsächlich während des ersten Kühlsteps an, während bei weiterer Kühlung nur noch geringere Zunahmen verzeichnet wurden. Tendenziell kann hier von einem logarithmischen Verlauf der Abrollwinkelzunahme bei zunehmender Kühlung der Oberfläche gesprochen werden. Bei *A. aurantiaca* und *H. halodendron* stieg der Abrollwinkel von Kühlstufe zu Kühlstufe zunehmend stärker an. Diese Abrollwinkeländerung kann eher mit einem exponentiellen Verlauf verglichen werden. Die Abrollwinkel bei *T. majus*, *C. esculenta* und *X. robustum* folgten eher einem linearen Anstieg. In wieweit diese Abrollwinkelverläufe in einem Zusammenhang mit der Oberflächenstruktur oder mit anderen Parametern stehen, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht geklärt werden.

A. macrorrhiza zählte in Bezug auf das Abrollverhalten zu den schlechtesten Oberflächen, was höchstwahrscheinlich auf die fehlende Feinstruktur zurückzuführen ist. Bei der Nukleation von Wasser in den Zwischenräumen der Papillen werden diese angefüllt und der Wenzel-Zustand herbeigeführt. Da zwischen den Papillen verbindend Kutikularfalten verlaufen (vgl. Bildtafel 3), wirken diese zusätzlich als Barrieren beim Verschieben der Dreiphasenkontaktklinie (Öner & McCarthy, 2000). Dies ist wahrscheinlich der Grund für das stark veränderte Abrollverhalten. Bereits eine Temperaturdifferenz von -5°C reichte aus, um die Tropfen vollständig an der Oberfläche anhaften zu lassen. Zu einem anderen Ergebnis kamen Wagner *et al.* (2003). Die Autoren untersuchten zwar nicht die Kondensation, sondern das Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten unterschiedlicher Oberflächenspannung bei Pflanzen, jedoch eignen sich die Ergebnisse dennoch für eine Diskussion über die Stabilität des Cassie-Zustands bei *A. macrorrhiza*. Wagner *et al.* (2003) verwendeten für ihre Benetzungsversuche Wasser-Methanol-Gemische. Je geringer die Oberflächenspannung der Flüssigkeit, desto höher sollte der Anteil der benetzten Fläche sein (de Gennes *et al.*, 2004). *A. macrorrhiza* wurde erst bei einer Oberflächenspannung unterhalb von 29 mN/m (=70% Methanol-Anteil) benetzt. Damit gehörte *A. macrorrhiza* neben *N. nucifera*, dessen Oberfläche erst ab einem Methanol-Anteil von 75% benetzt wurde, zu den besten Oberflächen in dieser Untersuchung. Eine Erklärung für den Unterschied zwischen dem Benetzungsverhalten bei Kondensation und bei Verwendung von Flüssigkeiten mit niedriger Oberflächenspannung ist schwierig. So könnten dynamische Kräfte, welche beim Aufprallen von Tropfen auf

superhydrophoben Oberflächen entstehen dafür verantwortlich sein, dass noch ein Abperlen möglich war. Interessanterweise gehörte die replizierte Oberfläche von *A. macrorrhiza* nicht mehr zu den besten Oberflächen im Versuch von (Wagner *et al.*, 2003) und das, obwohl Hydrophobierungsmittel eingesetzt wurden, welche einen wesentlich höheren Young-Kontaktwinkel erzeugen (Fürstner, 2002) als pflanzliche Wachse (Holloway, 1969b). Unter diesen Umständen hätte man ein wesentlich besseres Abperlverhalten erwartet. Eine Klärung des unterschiedlichen Benetzungsverhaltens von Wasser auf *A. macrorrhiza* in den Experimenten von (Wagner *et al.*, 2003) und den vorliegenden Experimenten können nur weitere Untersuchungen liefern.

Vergleichende Betrachtung des Benetzungsverhaltens von Wasser auf pflanzlichen Oberflächen bei einer Temperaturdifferenz von -15°C

Der Vergleich der Kontakt- und Abrollwinkel aller pflanzlichen Oberflächen bei der größten Temperaturdifferenz führte zu mehreren interessanten Erkenntnissen:

- i. Kontaktwinkeländerungen fielen bei fast allen Pflanzen nur moderat aus:
Die Auswirkung der Kondensation auf den Kontaktwinkel und die Gründe für die meist nur geringen Änderungen wurden bereits diskutiert (s.o.).
- ii. Röhrenchenwachse könnten mit nur geringen Änderungen der KW im Zusammenhang stehen:
Einen Hinweis darauf, welche Rolle die Röhrenchenwachskristalle bei der Benetzung spielen könnten, geben Untersuchungen zur Benetzung von nanostrukturierten Oberflächen. In der Arbeit von Journet *et al.* (2005) ermöglichten Kohlenstoffnanoröhrchen, die eine sehr ähnliche Form aufweisen wie beispielsweise die Nonacosanol-Röhrenchen von *Nelumbo nucifera* oder *Tropaeolum majus*, einen besonders stabilen Cassie-Zustand. Bei Versuchen, Tropfen zwischen die Strukturen zu drücken, konnte selbst bei einem ausgeübten Druck von 10kPa der Kontaktwinkel auf dieser Oberfläche nicht verändert werden.
- iii. Zellpapillen scheinen nur einen geringen Einfluss auf KW-Änderungen zu haben:
Die möglichen Gründe, wieso die Zellpapillen nur geringe Auswirkungen auf die Änderung der Kontaktwinkel haben, wurden bereits (s.o.) diskutiert. Für die drei doppeltstrukturierten (Zellpapillen + epikutikulare Wachse) Oberflächen muss jedoch bedacht werden, dass trotz Kondensation immer noch das Cassie-Stadium der

Tropfen vorliegt, wie die geringen Abrollwinkel beweisen. Unter diesen Bedingungen dringt zwar der Tropfen tiefer zwischen die Zellpapillen, jedoch wird eine vollständige Benetzung durch die Strukturgeometrien in Kombination mit den epikutikularen Wachsen verhindert. Der erhöhte Feststoffanteil wirkt sich nach der Formel von Cassie & Baxter (Gl. 1.3) stärker aus, so dass im Cassie-Zustand geringere makroskopische Kontaktwinkel resultieren als bei einigen Oberflächen im Wenzel-Zustand (bsp. *Apocynum cannabinum*).

- iv. Kondensation wirkt sich deutlich stärker auf den Abrollwinkel als auf den Kontaktwinkel aus:

Der Abrollwinkel wird maßgeblich von der Dreiphasenkontaktlinie beeinflusst (Öner & McCarthy, 2000). Im Wenzel-Zustand wird die Diskontinuität der Kontaktlinie stark herabgesetzt, wodurch sich die Abrollwinkel erhöhen. Bei Pflanzen, die einen starken Anstieg des adhäsiven Verhaltens aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass ein vollständiges Überführen in den Wenzel-Zustand stattgefunden hat. Bei einigen Pflanzen wie *Argemone mexicana*, *Cercidiphyllum japonicum* oder *Tropaeolum majus* ist die Abrollwinkelzunahme jedoch nur gering. Vor diesem Hintergrund erscheint es denkbar, dass bei den hierarchisch strukturierten Oberflächen auch Übergangsformen zwischen Cassie- und Wenzel-Zustand existieren. Denkbar sind beispielsweise Bereiche mit bereits benetzten und noch unbenetzten Strukturzwischenräumen unter dem Tropfen, die gleichzeitig vorliegen. Ähnliches konnten Wier & McCarthy (2006) sowie Otten & Herminghaus (2004) bereits unter der Lupe auf ihren Oberflächen beobachten. Einen echten Nachweis könnten jedoch nur weitere Untersuchungen bringen.

- v. Hierarchischer Strukturaufbau und Abrollwinkeländerungen hängen zusammen:
Alle Oberflächen mit einer Kombination aus Zellpapillen und epikutikularen Wachsen wiesen nur geringe Änderungen der Abrollwinkel auf. Wie bereits oben erwähnt war hierfür wahrscheinlich das energetisch bevorzugte Cassie-Stadium der Tropfen ausschlaggebend.
- vi. Bei Oberflächen mit Röhrenwachsen fielen die Änderungen des Abrollwinkels meist nur moderat aus:

Die geringsten Änderungen des Abrollwinkels wurden bei Oberflächen gemessen, die eine ausgeprägte Doppelstruktur aufweisen, dicht gefolgt von Oberflächen, die über den Wachstyp „Röhrchen“ verfügen (Abb. 7.30). Bei *Nelumbo nucifera*, dessen Blätter sowohl Zellpapillen als auch Röhrchenwachse besitzen, war gar kein Einfluss der Kondensation zu beobachten. Die möglichen Ursachen hierfür sind vielfältig. Während über die Auswirkungen der Doppelstruktur auf die Benetzung von superhydrophoben Oberflächen einige Arbeiten existieren (Carbone & Mangialardi, 2005; Gao & McCarthy, 2006a; Zhu *et al.*, 2005b), ist über den Einfluss der Feinstruktur bislang nur sehr wenig bekannt. Generell kann davon ausgegangen werden, dass die Gesetzmäßigkeiten zur Kontaktliniendiskontinuität (Öner & McCarthy, 2000), ebenso wie zum Einfluss der Form der Strukturen auf die Benetzung, auch in dieser Dimension gelten (Marmur, 2004). Cheng *et al.* (2006) gehen davon aus, dass bei Kondensation eine Vorbenetzung durch Nukleation des Wassers in den Zwischenräumen der Feinstruktur erfolgt. Sie führen in ihren Versuchen das Zusammenbrechen der Unbenetzbarkeit von Lotus darauf zurück. Diese Beobachtungen konnten in der vorliegenden Untersuchung nicht gemacht werden. Generell ist auch eine andere Variante der Nukleation von Wasser bei Röhrchenwachsen möglich. Bezieht man den molekularen Röhrchenaufbau mit in die Betrachtung ein, so ist denkbar, dass die Nukleation von Wasser bevorzugt an hydrophilen molekularen Domänen erfolgt (Quéré, 2004). Diese liegen im Fall von *N. nucifera* an dem apikalen Ende des Röhrchens. Das Röhrchen besteht zu hohem Anteil aus sekundären Alkoholen, wie dem Nonacosan-10-ol (Jeffree *et al.*, 1975) und dem Nonacosan-di-ol (Ensikat *et al.*, 2006) und bildet sich nach Koch *et al.* (2006a) in einem Selbstorganisationsprozess. Als Resultat der Selbstorganisation entsteht ein Röhrchen, dessen Hülle ausschließlich aus hydrophoben Methylesterverbindungen besteht, während am apikalen Ende Sauerstoffatome vorkommen. Eine Nukleation von Wasser findet wahrscheinlich bevorzugt an den Sauerstoffatomen statt (Abb. 7.68a). In Folge würden Zwischenräume der Feinstrukturen bei Kondensation nicht benetzen und damit der Abrollwinkel auch weniger beeinflusst. Dies könnte die geringere Auswirkung der Kondensation bei nahezu allen Oberflächen mit Röhrchenwachsen erklären. Schuppenwachse sind dagegen anders aufgebaut (Koch *et al.*, 2006b). Die von den Autoren untersuchten epikutikularen Wachsschuppen von Weizen bestehen überwiegend aus dem primären Alkohol Octacosan-1-ol. Eine charakteristische Komponente von

Wachsschuppen. Auf unpolaren Substraten entstehen im Kristallisationsprozess aufrecht stehenden Schuppen. Dabei sind die am Molekül endständig liegenden Sauerstoffatome entlang der Kante des Wachskristalls angeordnet. Diese hydrophilen Domänen werden bei Nukleation des Wassers begünstigt, so dass der Benetzungsvorgang auch in den Zwischenräumen der Wachskristalle erfolgen kann (Abb. 7.68b).

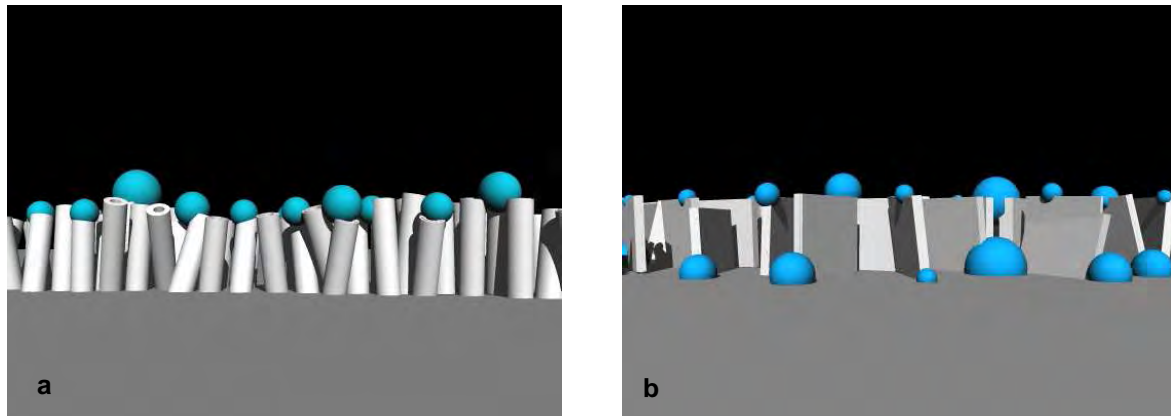


Abb. 7.68: Schematische Darstellung der möglichen Nukleation von Wasser bei Kondensation auf Oberflächen mit Röhrenwachsen (a) und mit Wachsschuppen (b)

Die Nukleation des Wassers in den Zwischenräumen der Kristalle bei Schuppenwachsen könnte erklären, warum besonders die Oberflächen mit diesem Wachstumstyp stärkere Änderungen des Benetzungsverhaltens aufwiesen. Ein Anfüllen der Räume zwischen Wachsschuppen führt an diesen Stellen zur Benetzung gemäß Wenzel, was in Folge eine höhere Adhäsion der Tropfen zur Oberfläche bewirkt. Hinzu kommt, dass bei Schuppenwachsen für die Dreiphasenkontaktlinie eine ähnliche Situation vorliegt, wie sie für die Gitterstrukturen von (Chen *et al.*, 1999) beschrieben wurde. Auf solchen Oberflächen existieren beim Verschieben der Kontaktlinie größere Energiebarrieren, da eine höhere Kontaktlinienkontinuität vorliegt (Öner & McCarthy, 2000). Die Röhrenwachse können vereinfacht als Säulen angesehen werden, für die die Autoren eine geringere Kontaktlinienkontinuität beschreiben. Dadurch ist wiederum die Verschiebung der Kontaktlinie mit weniger Energie verbunden und der Tropfen rollt leichter ab.

Vorkommen des Cassie- und Wenzelbenetzungszustands in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur

Der Cassie-Zustand ist durch hohe Kontaktwinkel und geringe Abrollwinkel gekennzeichnet (Marmur, 2004; Patankar, 2004a). Im Wenzelzustand dagegen können zwar hohe Kontaktwinkel vorliegen, die Hysterese und damit die Abrollwinkel sind jedoch stark erhöht (Lafuma & Quéré, 2003; Marmur, 2004). Die Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessungen bei verschiedenen Oberflächentemperaturen erlauben für die untersuchten pflanzlichen Oberflächen eine Prognose des jeweils vorliegenden Zustands (Tab. 7.4). Ausgehend davon, dass unter isothermen Bedingungen bei allen Pflanzen die Tropfen im Cassie-Zustand vorlagen, fand in einigen Fällen je nach Kühlstufe eine Umwandlung in den Wenzel-Zustand statt. Lediglich bei *Nelumbo nucifera*, *Colocasia esculenta* und *Xanthosoma robustum* blieb der Cassie-Zustand trotz Kühlung erhalten. Die Gründe dafür wurden bereits weiter oben diskutiert.

Tab. 7.4: Angenommene Benetzungszustände des Wassers auf pflanzlichen Oberflächen in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur (+ Cassie-Zustand; - Wenzel-Zustand; +/- Übergangszustand)

	$\Delta 0^\circ\text{C}$	$\Delta -5^\circ\text{C}$	$\Delta -10^\circ\text{C}$	$\Delta -15^\circ\text{C}$
<i>A. macrorrhiza</i>	+	-	-	-
<i>S. vulgaris</i>	+	+/-	-	-
<i>A. cannabinum</i>	+	+/-	-	-
<i>T. flavum</i>	+	+/-	+/-	-
<i>B. oleracea</i>	+	+/-	+/-	-
<i>A. aurantiaca</i>	+	+	+/-	-
<i>A. mexicana</i>	+	+/-	+/-	+/-
<i>H. halodendron</i>	+	+	+	+/-
<i>C. japonicum</i>	+	+	+	+/-
<i>T. majus</i>	+	+	+	+/-
<i>X. robustum</i>	+	+	+	+
<i>C. esculenta</i>	+	+	+	+
<i>N. nucifera</i>	+	+	+	+

Bei einigen Pflanzen ist eine Aussage über den vorliegenden Benetzungszustand schwierig. Diese sind in Tab. 7.4 mit einem +/- versehen. Die Abrollwinkel bei diesen Oberflächen waren zwar erhöht, jedoch nicht in dem Maße, das davon ausgegangen werden kann, dass ein vollständiger Wenzel-Zustand vorlag. In diesen Fällen muss angenommen werden, dass ein Zwischen- oder Übergangszustand vorhanden war. Dieser könnte dadurch gekennzeichnet sein, dass stellenweise gleichzeitig benetzte und unbenetzte Areale unter dem Tropfen vorkommen (Abb. 7.69). Besonders wenn die

Kondensation allmählich abläuft, sind solche Übergangszustände denkbar. Wier & McCarthy (2006) wiesen das gleichzeitige Vorkommen der benetzten und unbenetzten Areale bei geometrisch strukturierten Oberflächen rein makroskopisch nach, diskutieren jedoch nicht ihre Auswirkung auf den Abrollwinkel. Das Vorhandensein von teilweise unbenetzten Arealen unter einem Tropfen und ihre Stabilität diskutierten bereits Paterson & Fermigier (1997) und Nosonowski & Bhushan (2005b).

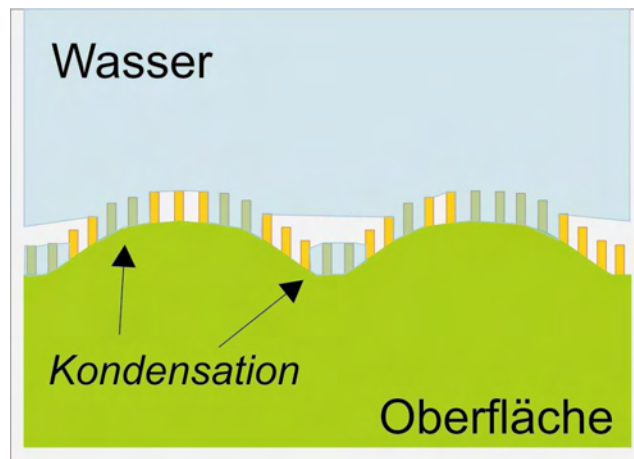


Abb. 7.69: Angenommenes Vorkommen von benetzten sowie unbenetzten Arealen auf einer Oberfläche im Übergangsstadium zwischen Cassie- und Wenzel-Zustand

Änderungen des Kontakt- und Abrollwinkels von Glycerin auf gekühlten pflanzlichen Oberflächen

Generell waren die Kontaktwinkel mit Glycerin, wie aufgrund der leicht geringeren Oberflächenspannung zu erwarten, geringer als mit Wasser.

Bei der Messung mit Glycerin führte Kühlung der Oberflächen bei keiner der verwendeten Pflanzen zu einer Änderung des Benetzungsverhaltens. Bei *Xanthosoma robustum*, *Alocasia macrorrhiza* und *Tropaeolum majus* zeigte sich lediglich ein leichter Trend zu geringeren Kontaktwinkeln bei stärkerer Kühlung.

Die tendenziellen Abnahmen des KWs können möglicherweise auf die Kondensation von Wasser aus der Umgebungsluft zurückgeführt werden. In der vorherigen Untersuchung kondensierte vorrangig das Wasser aus dem Tropfen auf der Oberfläche. Die Umgebungsluftfeuchtigkeit konnte unter diesen Bedingungen zunächst vernachlässigt werden. Bei den Untersuchungen mit Glycerin lag die rel. Luftfeuchtigkeit zwischen 40% und 50%. Da bei einer Kühlung um 15°C bereits ab einer rel. Luftfeuchte von ca. 40% Kondensation aus der Umgebungsluft auftritt (Tipler, 1994), ist davon auszugehen, dass die Zwischenräume der Strukturen auf der

Oberfläche ebenfalls mit Wasser gefüllt werden konnten und damit eine stärkere Benetzung möglich war.

Auch im Fall des Abrollwinkels wurde erwartet, dass eine Kühlung der Oberfläche keinen oder wegen der Umgebungsluftfeuchtigkeit nur einen sehr geringen Einfluss auf die Benetzungseigenschaften haben würde. Generell war der Abrollwinkel unter isothermen Bedingungen wegen der geringeren Oberflächenspannung von Glycerin (s. Gl. 1.6) bis zu vier Mal größer als mit Wasser. Dies ist mit zwei Effekten erklärbar. Zum einen führt die geringere Oberflächenspannung von Glycerin zu einer etwas stärkeren Benetzung der Oberfläche, wodurch sich der Anteil der benetzten Fläche im Vergleich zu Wasser erhöht (de Gennes *et al.*, 2004). Dadurch kommt es zu verstärkten Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeit und Feststoff, ein Abrollen der Tropfen wird erschwert (Extrand, 2002). Zum anderen besitzt Glycerin eine höhere Dichte, wodurch nach der Gleichung von Miwa *et al.* (2000) der Abrollwinkel größer wird (vgl. Gl. 1.9). Bei zwei Oberflächen (*Tropaeolum majus*, *Colocasia esculenta*) wurde ein deutlicher Einfluss der Oberflächentemperatur auf den Abrollwinkel gefunden. Als Ursache für diese Veränderung kommt erneut die Umgebungsluftfeuchte in Betracht. Dies ist aber im Falle von *C. esculenta* verwunderlich, da bei der Untersuchung mit Wasser bei dieser Pflanze kein Einfluss der Kondensation gefunden werden konnte. Es ist denkbar, dass die Erhöhung des Abrollwinkels ebenfalls auf lokalen Fehlstellen der Oberfläche beruhte, zumal die Änderung nur sehr gering ausfiel.

Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf gekühlten technischen Oberflächen

Die vier technischen Oberflächen wiesen unter Kondensationsbedingungen ein sehr unterschiedliches Benetzungsverhalten auf. Zwar führte auch hier in allen Fällen die Kondensation zu einer Reduktion des Kontaktwinkels, die Änderung fiel aber je nach Oberfläche unterschiedlich stark aus.

Circuit foil besitzt hauptsächlich partikuläre Strukturen, die homogen auf der Oberfläche verteilt sind und keine weitere Strukturierung aufweisen. Vereinfacht kann das Profil der Oberfläche als zwei übereinander gelagerte Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen und Amplituden angesehen werden (vgl. Abb. 7.70b). Die größere Welle besitzt eine Amplitude von 2,5-5 μm und eine Wellenlänge von 10-20 μm , die aufgelagerte Welle wiederum eine Amplitude von 0,25-0,5 μm und eine Wellenlänge von 1-2 μm . Auf dieser Oberfläche wurde die größte Änderung des KWs unter Kondensationsbedingungen gemessen. Außerdem wurde bei Kühlung ein Verlust der

Superhydrophobie festgestellt. In Anbetracht der Oberflächenstruktur lässt sich diese Änderung auf die Überführung der Benetzung vom Cassie- in den Wenzel-Zustand erklären. Eine ausgeprägte Feinstruktur der Oberfläche fehlt, deshalb wirkt sich die Kondensation stark aus. Unter Einbeziehung des stark vereinfachten Profilmodells müsste eine Oberfläche laut de Gennes *et al.* (2004) eine Amplitude der Erhebungen von mindestens $3,1 \mu\text{m}$ bei einer Wellenlänge von $10 \mu\text{m}$ ($6,2 \mu\text{m}$ bei $20 \mu\text{m}$ Wellenlänge) besitzen, damit das Kriterium für Lufteinschluss gegeben wäre. Die Erhebungen bei Circuit foil liegen teilweise unter diesen Werten. Unter der Annahme, dass die Feinstruktur ebenfalls eine Sinuskurve beschreiben würde und diese nicht der Grobstruktur aufgelagert wäre, sondern in einer Ebene läge, müsste die Amplitude bei der gegebenen Wellenlänge mindestens $0,31 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m}$ Wellenlänge) oder $0,62 \mu\text{m}$ ($2 \mu\text{m}$ Wellenlänge) betragen, damit Lufteinschlüsse möglich wären. Erst durch die Kombination beider Strukturebenen ist demnach ein Lufteinschluss möglich, ähnlich wie bei Herminghaus (2000) beschrieben. Die Annahme, die Circuit foil-Oberfläche sähe wie zwei übereinander gelagerte Sinuskurven aus, stellt zwar eine starke Vereinfachung dar, jedoch belegt der Unterschied von nur 10° zwischen dem KW unter Kondensationsbedingungen (127°) und dem Young-KW des Hydrophobierungsmittels Antispread ($\theta = 117^\circ$) (gemäß Fürstner, 2002) indirekt die geringe Rauigkeit der Oberfläche. Geht man davon aus, dass das Wasser unter Kondensationsbedingungen vollständig die Oberflächenrauigkeiten nachzeichnet, würde die Rauigkeit laut Wenzel-Gleichung (vgl. Gl. 1.2) nur $R_f = 1,32$ betragen (R_f stellt die projizierte benetzte Kontaktfläche zur glatten Oberfläche dar).

Ein anderes Extrem zeigt die Bolta Folie, die erheblich stärker strukturiert ist. Vereinfacht besteht die Oberfläche aus drei Strukturebenen (vgl. Abb. 7.70a). Die größten Erhebungen haben einen Abstand von $10 \mu\text{m}$ bis $25 \mu\text{m}$ und sind aus einer Vielzahl feinerer globulärer Strukturen aufgebaut. Deren Durchmesser beträgt etwa $1 \mu\text{m}$. Eine weitere Strukturebene stellen die in dem galvanischen Herstellungsprozess entstandenen filigranen Kupferoxid-Nadeln dar (vgl. Bildtafeln 11 & 12). Ihre Länge und ihr Durchmesser konnten mit dem verwendeten Raster-Elektronenmikroskop nicht mehr erfasst werden. Im Vergleich zur Circuit foil besitzt die Bolta Folie demnach eine zusätzliche Strukturebene. Ähnlich wie bei den hierarchisch aufgebauten Pflanzenoberflächen (vgl. Absch. *Vorkommen des Cassie- und Wenzelbenetzungszustands in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur*) konnte auch bei dieser technischen Oberfläche nur ein geringer Einfluss der Kondensation auf den

Kontaktwinkel festgestellt werden. Bei einer solchen Oberfläche wird der Cassie-Zustand wahrscheinlich energetisch bevorzugt, da die Bildung des Wenzel-Zustands physikalisch verhindert wird (Patankar, 2004a). Es ist denkbar, dass selbst in den Zwischenräumen der feinen Kupferoxidnadeln kondensierte Tropfen an Volumen zunehmen, eine kritische Grenze überschreiten und aus energetischen Gründen aus den Strukturzwischenräumen herausgezwungen werden. In diesem Fall würde eine Entnetzung stattfinden und der Tropfen resultierend im Cassie-Zustand vorliegen. Einen solchen Effekt haben (Carbone & Mangialardi, 2005) bereits für bestimmte Strukturgeometrien vorhergesagt.

Die beiden mit den Sprays erzeugten Oberflächen unterschieden sich bei der Benetzung unter Kondensationsbedingungen voneinander, obwohl sie auf Nanopartikeln ähnlicher Größe basieren (vgl. Bildtafeln 13; 13 & 14). Bei der Mincor[®]-Oberfläche sank der KW unter Kondensation stark, wohingegen bei der Creavis-Oberfläche bei der Temperaturdifferenz von -15°C ein noch verhältnismäßig hoher Kontaktwinkel gemessen wurde. Die Ursache für diesen Unterschied könnte darin liegen, dass bei der Mincor[®]-Oberfläche kein effektiver Lufteinschluss möglich war. Vereinfacht kann man sich die Oberfläche wie dicht gepackte, aneinander gereihte winzige Kugeln vorstellen (Abb. 7.70d). Die Zwischenräume werden in diesem Fall durch die Radien der Kugeln bestimmt. Auf einer solchen Oberfläche bleiben nur wenige Zwischenräume, in denen Luft eingeschlossen werden kann, übrig. Dass der hier gemessene Kontaktwinkel aber dennoch hoch war, kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

1. Bei Mincor[®] liegt eine starke Hydrophobie vor
2. Die Nanopartikel sind nicht perfekt dicht gepackt, wodurch auf der realen Oberfläche mehr Zwischenräume bestehen in denen Luft eingeschlossen werden kann

Eine ähnlich aufgebaute Oberfläche verwendeten Shang *et al.* (2005b) in ihren Untersuchungen. Auch in diesem Fall war zwar der KW hoch, jedoch besaß die Oberfläche einen hohen AW. Eine geringe Dynamik der Tropfen auf einer Oberfläche mit Nanohalbkugeln dokumentierten auch Shiu *et al.* (2004). Auch diese war ähnlich aufgebaut wie bei der mit Mincor[®]-Spray erzeugten Oberfläche.

Im Gegensatz dazu ist die Creavis-Oberfläche erheblich stärker strukturiert. Neben einer Wellung der Oberfläche liegen die Nanopartikel ungeordneter auf der Oberfläche verteilt. Überall entstehen feine Risse und Löcher, welche zusätzlich den Einschluss von

Luft ermöglichen (Abb. 7.70c). Auf dieser Oberfläche wirkte sich die Kondensation weniger stark auf den Kontaktwinkel aus.

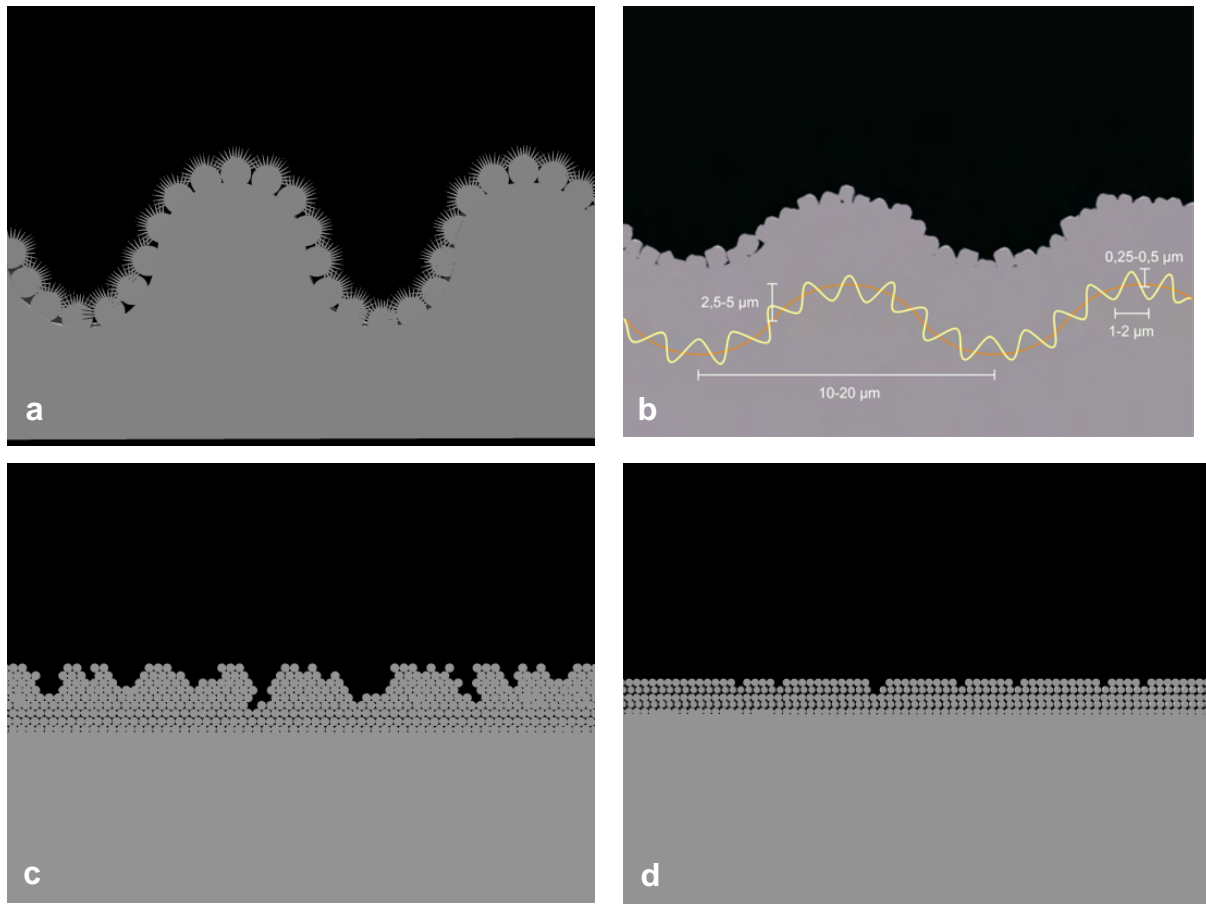


Abb. 7.70: Schematischer Aufbau der verwendeten Oberflächen; a) Bolta Folie b) Circuit foil mit abstrahierten, übereinander gelagerten Sinuskurven (orange, gelb) c) Creavis-Spray d) Mincor®-Spray

Änderung des Abrollwinkels von Wasser auf gekühlten technischen Oberflächen

Die Kondensation wirkte sich auf den Abrollwinkel stärker aus als auf den Kontaktwinkel. Dies unterstreicht die Forderung von Öner & McCarthy (2000) zur Beurteilung der Unbenetzbarkeit auch das dynamische Verhalten der Tropfen zu untersuchen. Bei den verwendeten technischen Oberflächen konnte eine deutliche Veränderung der Abrollwinkel bei Kühlung der Oberflächen beobachtet werden.

Bei der Bolta-Folie wirkte sich die Kondensation verhältnismäßig gering aus. Hier spielte sicherlich wieder die Topographie der Oberfläche eine entscheidende Rolle. Während der Kontaktwinkel allein noch keinen Rückschluss darüber erlaubt, ob eine Benetzung gemäß Cassie oder Wenzel vorliegt, offenbart das Adhäsionsverhalten der Tropfen den entsprechenden Benetzungszustand. Wie bei Quéré *et al.* (2003) beschrieben, geht der Cassie-Zustand mit einer geringen Hysterese (geringer Abrollwinkel) einher. Im Wenzel-

Zustand dagegen weisen Wassertropfen eine höhere Adhäsion auf. Die zusätzliche Strukturebene bei Bolta Folie, hervorgerufen durch die Kupferoxidnadeln, ermöglicht bei der Bewegung der Tropfen auf der Oberfläche ein leichteres Ablösen (Rückschreitwinkel) der Kontaktlinie. Die Energie zum Ablösen der Kontaktlinie ist auf einer solchen nanostrukturierten Oberfläche erheblich geringer, was sich auf die Kinetik der Wassertropfen auswirkt (Gao & McCarthy, 2006a). Die leichte, aber signifikante Änderung des Abrollwinkels auf der Bolta Folie unter Kondensationsbedingungen deutet darauf hin, dass eine Veränderung der Benetzung vorlag, jedoch keine vollständige Überführung in den Wenzel-Zustand stattfand. Ein Übergangsstadium mit gleichzeitig vorhandenen benetzten und unbenetzten Arealen, wie bereits weiter oben (vgl. Abb. 7.69) für pflanzliche Oberflächen diskutiert, ist wahrscheinlich. Während die meisten Autoren davon ausgehen, dass lediglich zwei stabile Energiezustände auf superhydrophoben Oberflächen vorliegen können, werden mittlerweile vermehrt auch Zwischenstufen als metastabile Energieniveaus diskutiert. So könnten auf einer Oberfläche unter dem Tropfen Areale mit homogener (Wenzel) und heterogener (Cassie) Benetzung gleichzeitig vorkommen. Ähnliches schlagen Carbone & Mangialardi (2005), Nosonovsky & Bhushan (2006) und Zheng *et al.* (2005) für technische Oberflächen vor. Solche lokal begrenzten Bereiche mit einer Penetration des Wassers in die Strukturzwischenräume bei Kondensation konnten Wier & McCarthy (2006) in ihren Untersuchungen direkt beobachten (vgl. dort die Abb. 3). Treten solche Stellen nur vereinzelt und in geringer Anzahl auf, so ist eine geringe Beeinflussung des Abrollwinkels zu erwarten. Dies konnte bei der Bolta Folie beobachtet werden, auf der sich der AW nur um ca. 8° veränderte. Da er damit noch unter die Definition für Superhydrophobie fällt, kann festgehalten werden, dass diese technische Oberfläche selbst unter Kondensationsbedingungen nicht ihre unbenetzbaren Eigenschaften verliert. Bei der Circuit foil, die keine weitere Strukturebene im Nanometermaßstab besitzt, wirkte sich die Kondensation auf den Abrollwinkel sehr stark aus. Bereits bei einer Kühlung um 5°C stieg der Abrollwinkel von $8,4^\circ$ auf über 60° . In diesem Fall dürften auf der Oberfläche bereits viele Bereiche vorgelegen haben, die homogene Benetzung aufwiesen. Bei weiterer Kühlung haftete der Tropfen vollständig an der Oberfläche (Wenzel-Zustand), wodurch er, wie von Quéré *et al.* (2003) beschrieben, nicht mehr abrollen konnte.

Bei den superhydrophoben Spray-Oberflächen wurde ebenfalls ein unterschiedliches Abrollverhalten von Tropfen unter Kondensationsbedingungen beobachtet. Die

Oberfläche des Creavis-Sprays ist außerordentlich wasserabweisend. Selbst bei einer Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Wasser von -15°C rollten die Tropfen bei Neigungswinkeln von 5° ab. Deutlich zeigt sich hier, wie wichtig offenbar die Nanostruktur für das Abrollverhalten ist. Die geringe Änderung ist damit zu erklären, dass noch überwiegend das Cassie-Stadium vorlag und für das Verschieben der Kontaktlinie nur wenig Energie benötigt wurde.

Bei der Mincor[®]-Oberfläche wirkte sich die Kondensation erheblich stärker aus, der Abrollwinkel stieg auf über 30° an ($\Delta -15^{\circ}\text{C}$). Zwar kann davon ausgegangen werden, dass eine Überführung in den Wenzel-Zustand stattgefunden hat, die geringe Rauigkeit der Oberfläche, verbunden mit der hohen Hydrophobie, ermöglichte wahrscheinlich ein leichtes Verschieben der Kontaktlinie, wodurch ein Abrutschen der Tropfen möglich war. Dabei verhielt sich die Oberfläche ähnlich einer glatten „easy-to-clean“ Oberfläche. Diese Oberflächenbeschichtungen bestehen aus Nanopartikeln, die stark hydrophob sind. Üblicherweise erzielt man mit solchen Oberflächen Abrollwinkel von $>20^{\circ}$, die Kontaktwinkel erreichen aber keine Werte über 120° . Bei der Mincor[®]-Oberfläche traten somit kombiniert Effekte auf, wie sie bei superhydrophoben bzw. „easy-to-clean“ Oberflächen zu beobachten sind.

Änderungen des Kontakt- und Abrollwinkels von Glycerin auf gekühlten technischen Oberflächen

Die Kontaktwinkel von Glycerin waren unter isothermen Bedingungen auf allen Oberflächen nur etwas geringer (1-2%) als die Vergleichswerte mit Wasser. Dieses Phänomen ist auf die Verwendung einer Flüssigkeit mit einer geringeren Oberflächenspannung zurückzuführen.

Eine Kühlung bewirkte bei allen Oberflächen lediglich eine tendenzielle Verringerung der Kontaktwinkel. Die geringen Abweichungen der Werte bestätigen die Annahme, dass ausschließlich die Kondensation von Wasser in den Zwischenräumen der Strukturen zu einer Benetzungsänderung führt. Da das Glycerin bei den eingestellten Temperaturen jedoch auf der Oberfläche nicht kondensierte, änderte sich auch die Unbenetzbarkeit nicht.

Im Falle der Abrollwinkel sollte die Verwendung einer Flüssigkeit mit einer geringeren Oberflächenspannung gemäß der Gl. 1.9 zu einer Erhöhung führen. Tatsächlich war in drei Fällen der Abrollwinkel von Glycerin etwas höher als der Abrollwinkel mit Wasser oder zumindest gleich. Abweichend verhielt sich die Circuit foil, auf der der AW mit

Glycerin deutlich niedriger war als der mit Wasser. Diese Diskrepanz konnte nicht geklärt werden.

Einzig bei der Bolta Folie führte die Kühlung der Oberfläche zu einer signifikanten Erhöhung des Abrollwinkels. Im Unterschied zu Wasser war die Handhabung der Tropfen auf den Oberfläche und damit die Analyse der AWs deutlich einfacher. Dies spiegelte sich bei der Messung mit Glycerin in den generell geringeren Schwankungen der Werte auf allen Oberflächen wider.

Der sehr hohe Abrollwinkel von Glycerin auf der Oberfläche des Mincor®-Sprays war unerwartet. Während mit Wasser die Tropfen bereits bei einem Neigungswinkel von ca. 5° abrollten, bewegten sich die Glycerintropfen erst bei einem Neigungswinkel von ca. 23° . Dieser große Unterschied kann nicht auf die höhere Viskosität von Glycerin zurückgeführt werden, da sich die Abrollwinkel der anderen Oberflächen kaum oder sehr wenig veränderten. Denkbar ist aber, dass eine nahezu vollständige Benetzung der Strukturzwischenräume auf Grund der geringeren Oberflächenspannung vorlag. Wird die Oberfläche vereinfacht als eine Aneinanderreihung von Nanopartikeln angenommen, so werden die Zwischenräume durch die Radien der Nanopartikel bedingt. Die Krümmungsradien ermöglichen bei geringen Youngs-Kontaktwinkeln ein tieferes Einsinken der Flüssigkeit in die Zwischenräume, wodurch der Anteil der eingeschlossenen Luft geringer wird. Je mehr benetzte Fläche vorliegt, desto höher sind die adhäsiven Wechselwirkungen (Lafuma & Quéré, 2003). In Folge dessen steigt der Abrollwinkel. Bei Glycerin auf der Mincor®-Oberfläche war wegen der geringeren Oberflächenspannung möglicherweise gar kein Lufteinschluss mehr möglich. Der Abrollwinkel wurde vermutlich ausschließlich durch die Energiebarriere beim Verschieben der Dreiphasenkontaktlinie bedingt. Unter diesen Umständen verhielt sich die Oberfläche ähnlich einer „easy-to-clean“-Oberfläche.

Kontaktwinkeländerung auf gekühlten Oberflächen in Abhängigkeit der Zeit

Während bislang ausschließlich die Kondensation nach kurzer Verweildauer der Tropfen auf der Oberfläche betrachtet wurde, sollte diese Untersuchung klären, ob bzw. wie stark sich der Kontaktwinkel bei längerer Verweildauer auf gekühlten Oberflächen ändert. Die Änderung der Kontaktwinkel bei Verdunstung von Tropfen auf superhydrophoben Oberflächen wurde bereits von McHale *et al.* (2005) beobachtet, allerdings ohne Einbeziehung von Kondensationseffekten. Narhe & Beysens (2006) untersuchten die Kondensation von Wasserdampf auf einer superhydrophoben,

geometrisch strukturierten Oberflächen, maßen dabei jedoch nicht die KW der entstehenden Tropfen, sondern hielten den Kondensationsprozess über die Zeit lichtmikroskopisch fest.

Bei einer längeren Verweildauer der Tropfen unter Kondensationsbedingungen sind unterschiedliche Auswirkungen auf die Benetzbarkeit denkbar:

- i: Der Kontaktwinkel ändert sich nicht, der Cassie-Zustand bleibt erhalten.
- ii: Der Kontaktwinkel ändert sich nur über einen kurzen Zeitraum, bleibt nach einer Weile aber konstant. Stellenweise liegen Bereiche mit heterogener und homogener Benetzung gleichzeitig unter dem Tropfen vor.
- iii: Die Zwischenräume der Strukturen werden zunehmend mit Wasser gefüllt, wodurch der Kontaktwinkel bis zum Erreichen des Wenzel-Zustands geringer wird, danach aber konstant bleibt.
- iii: Das Anfüllen der Zwischenräume findet kontinuierlich weiter statt, wodurch die Kontaktlinie zunehmend weiter verschoben wird und damit der Kontaktwinkel immer kleiner wird. Der Tropfen spreitet.

Wie bereits in den Versuchen zuvor führte das Absetzen des Tropfens auf der kühleren Oberfläche zur Kondensation des Wassers, wodurch der Kontaktwinkel bei allen drei untersuchten Oberflächen (*Colocasia esculenta*, *Alocasia macrorrhiza* und Bolta Folie) geringer wurde. Tatsächlich wurde bei allen untersuchten Oberflächen eine Änderung des KWs in Abhängigkeit der Zeit beobachtet. Je länger sich der Tropfen auf der kühleren Oberfläche befand, desto geringer wurde auch der Kontaktwinkel. Die größte Änderung fand innerhalb der ersten 60 Sekunden statt. Danach wurden keine oder nur geringe Änderungen des Kontaktwinkels festgestellt, selbst wenn über einen Zeitraum von 10 Minuten gemessen wurde (vgl. Ergebnis von *Alocasia macrorrhiza*).

Zieht man die Daten aus der Messung der Tropfentemperatur in Betracht, fällt auf, dass die Kontaktwinkeländerung weitestgehend mit der Änderung der Tropfentemperatur übereinstimmte. Während der Tropfen beim Absetzen noch Umgebungstemperatur besaß, fiel seine Temperatur nach dem Kontakt schnell ab und erreichte bald eine ähnliche oder gleiche Temperatur wie die Oberfläche. Diese Temperaturangleichung stimmte zeitlich weitestgehend mit der Änderung des Kontaktwinkels überein. Jeweils nach ca. 1 Minute war die Temperatur angeglichen.

Die Kontaktwinkel pendelten sich teilweise bei noch geringeren Werten ein als bei den Untersuchungen zuvor (vgl. Absch. Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf

gekühlten pflanzlichen Oberflächen). Bei *Colocasia esculenta* wurde nach fast drei Minuten noch ein KW von ca. 151° gemessen. Im Vergleich zu den vorherigen Messungen, bei denen ein Wert von $\sim 154^\circ$ festgestellt wurde, war die Änderung über die Zeit nur gering.

Bei Bolta Folie war die Anpassung der Tropfen- an die Oberflächentemperatur lediglich als Trend sichtbar. Aufgrund der starken Schwankung der Werte bestand kein eindeutiger Unterschied zwischen dem Anfangswert und dem End-KW nach 175s (vgl. Abb. 7.64). Das schnelle Angleichen der Tropfentemperatur bei Bolta ist wahrscheinlich auf die besonders gute Wärmeleitfähigkeit der Metallfolie zurückzuführen. Innerhalb der ersten 30 Sekunden nach Absetzen des Tropfens wurde bereits eine Temperatur von unter 10°C erreicht. Auf den thermographischen Bildern wirkt die Bolta Folie wärmer als die tatsächlich eingestellte Temperatur des Peltier-Elements. Dieser scheinbare Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass sich die Emissionskoeffizienten von Folie und Wasser unterscheiden.

Bei der Bolta Folie spielte die Zeit bei der Änderung der Benetzung nur eine geringe Rolle. Die tendenzielle Auswirkung der Kondensation, die in den ersten Sekunden erkennbar war, setzte sich nicht fort. Damit kann die Bolta Folie als ein Beispiel für eine technische Oberfläche angesehen werden, bei der selbst unter Kondensationsbedingungen kaum eine Änderung der Benetzbarkeit stattfindet. Sie entspricht mit ihrem hierarchischen Aufbau der Forderung von Lafuma & Quéré (2003), die für solche Oberflächen ein stabiles Cassie-Stadium vorhersagen. Die Oberfläche entspricht auch weitestgehend den Berechnungen von Patankar (2004b), der Kriterien für ein energetisch bevorzugtes heterogenes Benetzungsstadium ermittelte.

Ganz anders sieht das Ergebnis bei *Alocasia macrorrhiza* aus. Hier fiel der Kontaktwinkel bei längerer Verweildauer des Tropfens auf der Oberfläche noch deutlich weiter als bei den Messungen nach kurzer Verweildauer (vgl. Abb. 7.3). Bei einem Temperaturunterschied von -5°C lag der Kontaktwinkel nach 10 Minuten Untersuchungsdauer um 7° niedriger. Bei der größeren Temperaturdifferenz von -15°C fiel der Wert um 17° . *A. macrorrhiza* ist ein gutes Beispiel für eine Oberfläche, die unter normalen Verhältnissen eine sehr gute Unbenetzbarkeit aufweist, diese jedoch unter Kondensationsbedingungen verliert.

7.4 Folgerungen

Kondensation von Wasser kann zum Verlust der Unbenetzbarkeit von superhydrophoben Oberflächen führen. Vergleichsversuche mit Glycerin zeigten, dass tatsächlich nur die Nukleation von Wasser in den Zwischenräumen der Strukturen zur Änderung der Benetzungszustände führt. Erfolgt die Umwandlung des Cassie-Benetzungszustands in den Wenzel-Zustand, so ist dies mit dem Verlust der antiadhäsiven Eigenschaften verbunden. Während sich der Kontaktwinkel in den meisten Fällen nur geringfügig ändert, bleiben die Wassertropfen selbst bei hohen Neigungswinkeln an den Oberflächen haften.

Die Auswirkung der Kondensation ist jedoch oberflächenspezifisch. Bei einigen pflanzlichen sowie einem Teil der technischen Oberflächen konnte gezeigt werden, dass selbst große Temperaturdifferenzen auch über eine längere Zeitspanne hinweg zu keiner oder einer nur geringfügigen und vernachlässigbaren Änderung der Unbenetzbarkeit führen. Änderungen ergeben sich hauptsächlich in den ersten 60 Sekunden, der Zeit, die der Tropfen benötigt, um die Temperatur der Oberfläche anzunehmen. Die Oberflächen mit den geringsten Änderungen der Benetzungseigenschaften sind durch hierarchische Strukturen gekennzeichnet. Mehrere Skalenebenen bis in den Nanometerbereich sind notwendig, um eine Oberfläche zu erhalten, bei der selbst unter Kondensationsbedingungen ausschließlich der Cassie-Zustand vorliegt. Beste Beispiele für solche Oberflächen waren in den Untersuchungen die Blätter der Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera*) und bei den technischen Oberflächen die Bolta Folie.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für eine geringe Veränderung der extremen Unbenetzbarkeit unter Kondensationsbedingungen die Oberflächen folgende Strukturprinzipien aufweisen müssen:

- I: Eine stark ausgeprägte Struktur im Mikrometerbereich mit ähnlichen Dimensionen und Abständen wie die Zellpapillen von *Nelumbo nucifera*.
- II: Eine Feinstruktur im oberen Nanometerbereich in Röhren- oder Säulenform.
- III: Hydrophile Domänen bevorzugt an den apikalen Enden der Feinstruktur, um eine Nukleation bevorzugt in diesen Regionen stattfinden zu lassen.

8. Schlussbetrachtung

Pflanzliche superhydrophobe selbstreinigende Oberflächen stellen einen effektiven Schutz gegenüber den meisten Mikroorganismen dar. Einige wenige Spezialisten wie die Mehлтаupilze haben dennoch Anpassungen entwickelt, die es ihnen ermöglichen, sich auf diesen Oberflächen zu etablieren. Dabei nutzen sie im Gegensatz zu den meisten Mikroorganismen trockene Perioden aus, um die Pflanzen zu infizieren. Das für die Keimung benötigte Wasser bringen sie selbst als Vorrat mit.

Bei technischen Oberflächen stellen selbstreinigende Eigenschaften einen effektiven Schutz vor Algen dar. Im Vergleich zu den meisten herkömmlichen Fassadenfarben und Dachziegeln, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, war der Algenbewuchs auf den funktionalen selbstreinigenden Baustoffoberflächen deutlich geringer. Dabei spielte die Trockenheit (Unbenetzbarkeit) eine wichtige Rolle bei der Unterbindung des Bewuchses.

Die Unbenetzbarkeit superhydrophober Oberflächen ist jedoch nicht immer gegeben. Physikalische Einflüsse wie die Kondensation können zum Verlust dieser Eigenschaft führen. Bei Kondensation verwandelt sich die antiadhäsive Oberfläche in eine sehr gut benetzbare Oberfläche, auf der Tropfen besser haften bleiben als bei glatten Oberflächen. Der Verlust der Unbenetzbarkeit unter Kondensationsbedingungen findet nicht zwangsläufig statt, er hängt vielmehr von der Struktur der Oberfläche ab. Aufbau und Form der Strukturen spielen dabei eine wichtige Rolle. Pflanzen oder technische Oberflächen, die hierarchisch aufgebaut sind, behalten ihre superhydrophoben Eigenschaften auch bei sehr starker Kondensation. Die Entwicklung solcher Oberflächen muss das Ziel im Bereich der Superhydrophobie und Selbstreinigung sein, damit Baustoffe effizient vor Mikroorganismen geschützt werden können und die Unbenetzbarkeit auch unter ungünstigen Bedingungen gewährleistet ist.

9. Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass auch unter Kondensationsbedingungen stabile Superhydrophobie möglich ist. Der strukturelle Aufbau pflanzlicher Oberflächen wie von *N. nucifera* und *C. esculenta* ermöglicht das energetisch bevorzugte Cassie-Benetzungsstadium und garantiert dadurch die Aufrechterhaltung der Selbstreinigung. Welche Strukturparameter dafür jedoch ausschlaggebend sind, ist bislang noch ungeklärt. Moderne profilometrische Methoden wie die Laser-Konfokalmikroskopie oder die Weißlichtprofilometrie liefern zahlreiche Messdaten zu den biologischen Oberflächen (Bhushan & Jung, 2006), die für eine Korrelation mit Benetzungseigenschaften herangezogen werden können. Gleichzeitig ermöglichen moderne Replikaverfahren (Göltner-Spickermann, 2003; Lee & Kwon, 2006; Yan *et al.*, 2002) in Kombination mit neuesten Erkenntnissen zur Selbstorganisation der Wachse auf technischen Oberflächen (Koch *et al.*, 2006a) die getrennte Untersuchung der einzelnen Strukturebenen. Solche Untersuchungen könnten zukünftig helfen, das Phänomen der stabilen Superhydrophobie besser zu verstehen.

Als optimierte Oberflächen können Pflanzen wie Lotus die Basis für die Gestaltung technischer Oberflächen bilden, die bei Baustoffen eine trockene Oberfläche auch unter Kondensationsbedingungen gewährleisten. Die Trockenheit einer Oberfläche ist dabei der Schlüssel für erschwerte Besiedelbarkeit durch Mikroorganismen. Zukünftig wäre die Optimierung selbstreinigender Baustoffe nach den Konstruktionsprinzipien von Lotus wünschenswert.

Zur Kontrolle der Besiedelbarkeit von konventionellen und funktionalen Baustoffen wird der Ausbau einer Labortestmethode als aussichtsreich erachtet. Die Simulation natürlicher Depositionswege (Trocken- und Nassinokulation), Verwendung besiedlungsaggressiver und baustoffspezifischer Organismen, Einbindung von Temperaturschwankungen zur Nachahmung von Kondensation und die Analyse mittels moderner bildgebender Verfahren (bsp. Puls-Amplituden Fluorimetrie) könnten die Vorhersage des Mikroorganismenbewuchses von Baustoffen deutlich verbessern. Einen vollständigen Ersatz für Freilanduntersuchungen können solche Testverfahren aufgrund der Komplexität der natürlichen Bedingungen und der Vielzahl von Einflussparametern aber nicht bieten.

Die unbenetzbaren biologischen Oberflächen stellen durch die Trockenheit und die Selbstreinigung einen guten Schutz vor Pathogenen dar. Jedoch haben die hier vorgelegten Versuche gezeigt, dass spezialisierte Pilze in der Lage sind diese

physikalische Barriere zu überwinden. Ihre Anpassung an trockene Bedingungen bietet gleichzeitig jedoch auch eine Möglichkeit ihrer Bekämpfung bei Nutzpflanzen, wie dem Weizen. Periodische Verneblung von Wasser im Bestand, vorwiegend an trockenen und warmen Tagen, könnte das Befallsrisiko von Mehltau verursachenden Pilzen stark reduzieren. Eine Überprüfung dieser These im Freilandversuch könnte zu interessanten Erkenntnissen im Nutzpflanzenbereich führen.

10. Zusammenfassung

Zahlreiche Fragen im Zusammenhang mit den Oberflächenphänomenen Superhydrophobie und Selbstreinigung sind noch unbeantwortet. Erstmals wurden umfassend zu diesem technisch hoch interessanten Themenkomplex mehr als 380 Publikationen aus der Biologie und der Technik zusammengetragen. In der vorliegenden Arbeit wurde die Diskrepanz zwischen Selbstreinigung und dem Befall von Pflanzen wie Weizen (*Triticum aestivum*) und Lotus (*Nelumbo nucifera*) mit mehltauerregenden Pilzen in Abhängigkeit von Niederschlägen untersucht. Ein Zusammenhang zwischen Niederschlägen und Abreinigung konnte gezeigt werden. Die dennoch erfolgreiche Infektion ist auf die besondere Anpassung von echten Mehлтаupilzen an trockene Bedingungen zurückzuführen.

Die Besiedlung von Fassadenfarben und Dachziegeln mit Mikroalgen, welche Zerstörungen bei Baustoffen verursachen können, wurde in einem Laborexperiment mit simulierten Freilandbedingungen untersucht. Bei selbstreinigenden Baustoffen konnte eine Verringerung der Besiedlung im Vergleich zu konventionellen Baustoffen festgestellt werden.

Kondensation führt gemäß aktuellen Erkenntnissen zu einem Verlust der antiadhäsiven Eigenschaften unbenetzbarer Oberflächen. Bei 13 untersuchten Pflanzenarten und vier technischen Oberflächen konnte gezeigt werden, dass die Änderung der Benetzbarkeit von strukturellen Parametern bestimmt wird und Oberflächengeometrien existieren, welche ausschließlich den antiadhäsiven Zustand energetisch bevorzugen.

Die Entdeckung und Entschlüsselung der Funktionsprinzipien unbenetzbarer und selbstreinigender pflanzlicher Oberflächen hat in den letzten Jahren zu einer starken Forschungsaktivität in den Materialwissenschaften geführt. In dieser Arbeit wird erstmals eine zusammenfassende Darstellung von Arbeiten zu den Themen Superhydrophobie und Selbstreinigung vorgelegt. Allein in den Jahren 2000-2007 wurden zu diesen Themen über 200 Publikationen veröffentlicht. Dabei konzentrieren sich die Arbeiten fast ausschließlich auf die Unbenetzbarkeit. Die damit im Zusammenhang stehende Eigenschaft „Selbstreinigung“ wird bislang nur in wenigen Arbeiten behandelt. Inzwischen existieren zahlreiche Verfahren, wie unbenetzbare und selbstreinigende Oberflächen hergestellt werden können. Immer neue Einsatzbereiche werden für diese

Technologie beschrieben. Dennoch sind zahlreiche Fragen im Zusammenhang mit der Unbenetzbarkeit und der Selbstreinigung, beispielsweise die Auswirkung auf die Besiedlung der Oberflächen mit Mikroorganismen oder der Einfluss der Kondensation, noch unbeantwortet.

In einem Laborexperiment wurde untersucht, wie es dem obligat biotrophen Mehltauverursacher *Blumeria graminis* gelingt, die unbetzbaren Blattoberflächen von Weizen (*Triticum aestivum*) zu besiedeln und in Folge die Pflanze zu infizieren. Zu diesem Zweck wurden Weizenblätter mit intakten und zerstörten Wachsen miteinander verglichen. Untersucht wurden sowohl die Benetzbarkeit der Blätter, wie auch die Abreinigung von Schmutzpartikeln und *Blumeria*-Konidien durch Niederschläge. Dabei kamen simulierter Nebel und simulierter Regen zum Einsatz. Bei der Abreinigung der *Blumeria*-Konidien wurden zudem die Zeitspannen zwischen Inokulation der Blätter und dem Niederschlag variiert. Bei den Selbstreinigungsversuchen wurden die Anzahl verbliebener Schmutzpartikel/Konidien und die Keimrate der Konidien erfasst.

Es wurde gezeigt, dass Weizenblätter eine extrem hohe Unbenetzbarkeit aufweisen. Diese ging nach dem Abwischen der Blattoberflächen mit einem Wattebausch verloren. Auf abgewischten Weizenblättern blieben in Selbstreinigungsexperimenten nach simulierter Beneblung deutlich mehr Schmutzpartikel liegen als auf den Oberflächen mit intakten Wachsen. Auf letzteren wurden nahezu alle Partikel abgewaschen. Weitere Experimente mit *Blumeria*-Konidien zeigten, dass bei intakten Weizenblättern nahezu alle Konidien abgereinigt wurden. Von Oberflächen mit zerstörten Wachsen wurden dagegen kaum Konidien abgewaschen. Durch simulierten Nebel wurden, aufgrund der fehlenden Kinetik der Wassertropfen, generell weniger Konidien abgewaschen als durch simulierten Regen. Auch der Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses nach der Landung der Konidien spielt eine Rolle für die Selbstreinigungseffizienz. Je später der Niederschlag, desto weiter vorangeschritten war bereits die Keimung und damit verbunden eine irreversible Anheftung an die Oberflächen. Auf Blättern mit abgewischten Wachsen keimten generell deutlich weniger Konidien als auf den Blättern mit intakten Wachsen. Während auf den intakten Oberflächen eine Keimung normal verlief, bildeten auf den abgewischten Blättern viele Konidien fehlerhafte Keimschläuche („tropic mistakes“).

Der Verlust der Unbenetzbarkeit war auf die Zerstörung der Strukturen der Wachsschuppen zurückzuführen. Eine vollständige Entfernung der Wachse fand dabei jedoch nicht statt, so dass die Oberflächenchemie erhalten blieb. Die Zerstörung der

Wachstruktur und damit die Veränderung der Benetzbarkeit führten zum Verlust der selbstreinigenden Eigenschaften. Sowohl Schmutzpartikel wie auch *Blumeria*-Konidien wurden nur wenig oder kaum abgewaschen. Aufgrund des schnellen Keimverhaltens der Konidien spielt auch die Zeit auf der Oberfläche zwischen Landung und Niederschlag eine große Rolle. Besonders, wenn ein Niederschlagsereignis mit kaum oder wenig kinetischer Energie auftritt. Möglicherweise erkennen die *Blumeria*-Konidien auch die Struktur der Oberfläche, da auf intakten Wachsen prozentual deutlich mehr Konidien ausgekeimt sind. Die erfolgreiche Infektion von Weizen mit *B. graminis* ist auf spezielle Anpassungen des Pilzes an die unbenetzbaren Oberflächen zurückzuführen. Die Verbreitung findet bevorzugt an trockenen Tagen statt. Zudem führt der Pilz einen eigenen Wasservorrat mit, der es ihm ermöglicht auf trockenen Oberflächen schnell zu keimen. Auf diese Weise ist die Gefahr, mit Niederschlägen abgewaschen zu werden, deutlich reduziert.

Als weitere Pflanze zur Untersuchung von Pilzbefall auf unbenetzbaren Blättern wurde Lotus (*Nelumbo nucifera*) ausgewählt. In einem Freilandexperiment wurde bei Lotus der Befall mit einem Mehлтаupilz über einen Zeitraum von 5-6 Wochen beobachtet. Der gefundene Pilz wurde als *Oidium spec.* bestimmt und war bislang als Pathogen von Lotus noch nicht bekannt. Um den Einfluss der Niederschläge auf den Befall zu untersuchen wurden Lotuspflanzen überdacht und teilweise zusätzlich beregnet. Blätter, die zweimal pro Tag einem simulierten Niederschlag ausgesetzt waren, wiesen im Verlauf der Untersuchungen den geringsten Befall mit *Oidium spec.* auf, während die überdachten Blätter, die keinem Niederschlag ausgesetzt waren, stets die stärkste Pilzbelegung aufwiesen. Die Blätter, welche ausschließlich natürlichem Niederschlag ausgesetzt wurden, wiesen einen von Trockenperioden abhängigen Befall auf. In Wochen mit besonders wenig Niederschlag stieg der Befall auf diesen Blättern stark an. Auch eine jahreszeitliche Abhängigkeit des Befalls wurde festgestellt. Im Frühsommer wurde generell weniger, im Spätsommer dagegen deutlich mehr Pilzbefall verzeichnet. Die Ergebnisse des Experiments lassen vermuten, dass auch *Oidium spec.*, ähnlich wie zuvor für *Blumeria graminis* diskutiert, über spezielle ökologische Anpassungen zur Besiedlung unbenetzbarer Blätter verfügt.

In einer weiteren Untersuchung wurden unbenetzbare selbstreinigende (funktionale) mit konventionellen Baustoffen hinsichtlich ihrer Besiedelbarkeit durch Algen betrachtet. Fassadenfarben- und Dachziegelprüfkörper mit unterschiedlichem Benetzungsverhalten wurden in zwei 10-12 Wochen dauernden Laborexperimenten einem starken

Besiedlungsdruck mit aeroterrestrischen Algen ausgesetzt. Die Algen wurden über eine Nassdeposition aufgebracht und in einer Klimakammer mit simulierten Umweltbedingungen inkubiert. Die Prüfkörper wurden regelmäßig beregnet und das Algenwachstum wöchentlich mittels Fluoreszenzmikroskopie nicht invasiv kontrolliert. Selbstreinigende unbenetzbare Oberflächen haben generell eine Ansiedlung von Algen unterbunden oder zumindest verringert. Das Ergebnis belegt, dass die Feuchtigkeit auf Baustoffen ein entscheidender Faktor für die Ansiedlung von Algen ist.

In einem weiteren Experiment wurde der Einfluss der Kondensation auf Kontakt- und Abrollwinkel von 13 Pflanzenarten und vier technischen Oberflächen untersucht. Die Kondensation wurde durch rückseitige Kühlung der Oberflächen herbeigeführt. Die Temperatur der Oberflächen wurde mittels eines Peltier-Elements um 5°C, 10°C und 15°C reduziert. Zum Vergleich wurden die Kondensationsexperimente mit nicht kondensierendem Glycerin auf fünf der 13 Pflanzenarten und den technischen Oberflächen wiederholt.

Die Kondensation bewirkte in den meisten Fällen eine deutliche Reduktion des Wasser-Kontaktwinkels. Nur bei wenigen pflanzlichen und technischen Oberflächen wurde keine Veränderung festgestellt. Auch der Wasser-Abrollwinkel veränderte sich unter Kondensationsbedingungen. Bei einigen Oberflächen stieg er zum Teil so stark an, dass selbst bei einem Kippwinkel von 90° die Tropfen nicht mehr abrollten. Dagegen änderte sich das Benetzungsverhalten gegenüber Glycerin kaum, da keine Kondensation aus dem Tropfen auf der Oberfläche stattfand. Die Veränderung des Benetzungsverhaltens bei Verwendung von Wasser konnte auf strukturelle Unterschiede der Oberflächen zurückgeführt werden. Je nach Struktur wurden bei der Kondensation die sonst luftgefüllten Zwischenräume benetzt, so dass es zum Umschlagen des Benetzungszustands kam. Doppeltstrukturierte Oberflächen wie die von *N. nucifera*, ebenso technische Oberflächen wie beispielsweise Bolta Folie änderten ihr Benetzungsverhalten unter Kondensationsbedingungen kaum. Es ist zu vermuten, dass selbst unter Kondensationsbedingungen energetisch der Cassie-Zustand bevorzugt wird. Neben dem hierarchischen Aufbau der Oberflächen wird auch die Bedeutung der Feinstruktur (Röhrchen- oder Schuppenwachse) als Ursache für ein verändertes Benetzungsverhalten diskutiert.

11. Summary

Several questions regarding the phenomena superhydrophobicity and self-cleaning were still unanswered. For this reason, more than 350 publications on the subjects superhydrophobicity and self-cleaning have been analysed in this thesis. It was investigated how pathogenic fungi causing powdery mildew are able to infect certain plant species (wheat, lotus) although these plants have self-cleaning surfaces. Precipitation was supposed to be a key factor for an effective self-cleaning. A relationship between precipitation and the removal of pathogens from the surfaces of wheat and lotus was found. It is concluded that the successful infection by fungi causing powdery mildew is probably due to specific adaptations of these organisms enabling them to cope with dry conditions. In an experiment under controlled conditions the colonization of façade paints and roof tiles with microalgae was investigated. Microalgae are considered to seriously damage building materials. It could be shown that building materials with self-cleaning surfaces were significantly less covered with microalgae than conventional surfaces. According to the latest knowledge, condensation causes a loss of anti-adhesive properties with superhydrophobic surfaces. By investigating 13 different plant species and four technical surfaces it was revealed that changes in the wetting regime on micro- and nanostructured surfaces strongly depend on surface geometry.

The discovery and identification of the principles behind superhydrophobic and self-cleaning properties of certain plant surfaces initiated extensive research activities in material sciences. With this thesis a comprehensive overview on the subjects superhydrophobicity and self-cleaning is given for the first time. More than 200 articles on these two subjects have been published in the short period between 2000 and 2007. Most of these articles focus on water-repellency whereas only a few studies on self-cleaning have been carried out so far. Currently, there are several methods to produce water-repellent and self-cleaning surfaces. The number of applications for such surfaces is constantly increasing. However, numerous questions in this context have not been adequately answered yet. This holds particularly for the relationship between superhydrophobicity and self-cleaning on one hand and the colonization of such surfaces with microorganisms or effects of condensation on the other.

In an experiment it was investigated why the pathogenic fungi *Blumeria graminis* which causes powdery mildew can colonize wheat (*Triticum aestivum*) although the leaves of this plant are water-repellent. Wheat leaves with intact waxes were compared to such with wiped wax crystals. Differences between the samples regarding wettability, removal rate of particles and removal rate of *Blumeria* conidia by artificial precipitation were of interest. Artificial precipitation included simulated fog and simulated rain. The period between inoculation with conidia and exposition of the samples to artificial precipitation was varied. After each precipitation event the number of particles or conidia on the leaf samples and the germination rate of the conidia was recorded.

It was shown that wheat leaves are extremely water-repellent. This extreme water-repellency could not be observed in the leaf samples which had been wiped before. After the treatment with artificial fog significantly more particles remained on leaf samples with wiped wax crystals than on those with an intact surface structure. Similar results were obtained in the experiments with *Blumeria* conidia. In general, simulated rain removed conidia more effectively than simulated fog. This was probably due to the higher kinetic energy of rain droplets as compared to the fine mist. An influence of the interval between inoculation and artificial precipitation on the efficiency of the self-cleaning mechanism could also be revealed; the longer the period between inoculation and precipitation, the higher the rate of conidia remaining on the leaves. This could be explained by the beginning germination and hence an increased adhesion of the conidia. On leaves with wiped wax crystals the germination rate of conidia was distinctly lower than on such with intact wax crystals. Moreover, on the wiped leaves many conidia developed deformed germ tubes ('tropic mistakes').

The loss of water-repellency could be due to the experimental destruction of the surface microstructure. Since the wiping only damaged the wax crystals and did not completely remove the wax layer, surface chemistry remained unaffected. The destruction of the surface microstructure and, as a consequence, the alteration of surface wettability caused a loss of the self-cleaning properties. This resulted in a significantly reduced removal of both particles and conidia. Since *Blumeria* conidia germinate quickly after landing on an appropriate surface, the length of the period between inoculation and precipitation was considered to be of major importance. This held particularly for precipitation with low kinetic energy. The fact that on surfaces with intact microstructure the germination rate was significantly higher than on those with wiped wax crystals led to the assumption that *Blumeria* conidia are able to 'recognize' surface structures. The

successful infection of wheat by *B. graminis* could be due to some specific adaptations of this pathogen to water-repellent surfaces. The dispersal of the fungi takes place predominantly when the weather is dry. Moreover, *B. graminis* stores water in its spores which enables the mildew to germinate on dry surfaces promptly. In this way the risk to get washed off by precipitation is considerably reduced.

Further investigations on the infection of plants with water-repellent surfaces by pathogenic fungi were carried out with lotus (*Nelumbo nucifera*). In a field experiment the infection of lotus with a fungi that causes powdery mildew was studied over several periods of 5-6 weeks each. The fungus found on lotus was identified as *Oidium* spec. Until then, this genus was not known to be a pathogen of lotus. To investigate the impact of precipitation on the colonization success of the fungi, the lotus plants were partially covered with transparent roofs and partially exposed to artificial rain. As a result, those leaves which had been exposed to artificial rain twice each day showed only slight coverage with the pathogenic fungi. On the other hand, the leaves protected by transparent roofs which had not obtained any precipitation were covered most. The infestation of the leaves which had been exposed to natural precipitation only coincided with the weather conditions: In periods with low precipitation rates the coverage with *Oidium* spec. strongly increased. Also seasonal variations could be detected. In early summer the coverage was generally lower whereas in late summer it typically increased. It is concluded that *Oidium* spec. has developed similar adaptations to water-repellent surfaces as *Blumeria graminis*.

In an experiment under controlled conditions water-repellent self-cleaning (functional) building materials were compared to conventional building materials regarding their susceptibility to algae infestation. Façade paints and roof tiles with various wetting behaviour were exposed to high experimental loads of airborne algae. The algae were deposited on the surfaces by simulated wet deposition. Afterwards the samples were stored in a climate chamber and were periodically exposed to artificial rain. The algae growth was controlled weekly by non-invasive fluorescence microscopy.

On the self-cleaning water-repellent surfaces the coverage with algae was either lower than on the conventional surfaces or algae establishment was completely prevented. The result of the experiment confirmed that humidity is a key factor for algae colonization of building materials.

In a further experiment which included 13 plant species and four different technical surfaces the influence of condensation on contact angles and sliding angles was investigated. Condensation was achieved by cooling surface samples from their reverse side with a peltier element. Three temperature differences to the environment were chosen: 5°C, 10°C and 15°C. The experiment was repeated with glycerine because this substance does not condense under the adjusted conditions.

With water, condensation produced distinct reductions of contact angles in most cases. No effect of condensation was found only in a few plant and technical surfaces. Condensation also affected sliding angles: with some surfaces sliding angles increased to a degree that even at angles of 90° droplets did not move anymore. In contrast to this, with glycerine such changes of contact angles and sliding angles could not be observed because no condensation from the glycerine droplets on the surfaces occurred.

The changes in the wetting behaviour if water was used could be explained by differences in surface geometry. In some surfaces, condensation led to a wetting of spaces which are normally filled with air. This caused a turn of the wetting regime. On double-structured surfaces of *N. nucifera* or Bolta foil such changes did not occur. It is suggested that even if condensation is forced the Cassie regime is energetically favoured on these double-structured surfaces. Besides the hierarchical composition also the fine structure (tube- or platelet-shaped waxes) is supposed to have an influence on the wetting behaviour.

12. Literaturverzeichnis

- Acatay K., M.A. Gulgun & Y.Z. Menciloglu.** 2005a. Process for preparing superhydrophobic surface compositions, surfaces obtained by said process and use of them. WO 2005/021843 A1.
- Acatay K., E. Simsek, C. Ow-Yang & Y.Z. Menciloglu.** 2005b. Tunable, superhydrophobically stable polymeric surfaces by electrospinning. *Angewandte Chemie* **116**, 5322-5325.
- Adam N.K.** 1958. Wasserabweisende Oberflächen. *Endeavour* **17**, 37-41.
- Adam N.K.** 1963. Principles of water-repellency. In: Moilliet J.L., ed. *Waterproofing and water-repellency*. Amsterdam: Elsevier, 1–23.
- Agarwal S., S. Horst & M. Bognitzki.** 2006. Electrospinning of fluorinated polymers: formation of superhydrophobic surfaces. *Macromolecular Materials and Engineering* **291**, 592-601.
- Agrios G.N.** 1997. *Plant Pathology*. San Diego: Academic Press, 635.
- Alberti G. & A. DeSimone.** 2005. Wetting of rough surfaces: a homogenization approach. *Proceedings of the Royal Society London A* **461**, 79-97.
- Allcock H.R., L.B. Steely & A. Singh.** 2006. Hydrophobic and superhydrophobic surfaces from polyphosphazenes. *Polymer International* **55**, 621-625.
- Allen E.A., H.C. Hoch, J.R. Steadman & R.J. Staveley.** 1991. Influence of leaf surface features on spore deposition and the epiphytic growth of phytopathogenic fungi. In: Andrews J.H., Hirano S.S., eds. *Microbial ecology of leaves*. New York: Springer, 87-110.
- Allsopp D. & K.J. Seal.** 1986. *Introduction to biodeterioration*. London [u.a.]: Edward Arnold, 136.
- Almihanna A. & D. Lösel.** 1995. Effects of powdery mildew on the leaf surface waxes of wheat. In: Kader J.-C., Mazliak P., eds. *Plant lipid metabolism*: Kluwer Academic Publishers, 414-416.
- Anantharaju N., M. Panchagnula, W. Kimsey, S. Neti & S. Tatic-Lucic.** 2006. Surface topography induced ultrahydrophobic behavior: Effect of three-phase contact line topology. Cookeville TN: Tennessee Technological University, 7.
- Andersen R.A.** 2004. Biology and systematics of heterokont and haptophyte algae. *American Journal of Botany* **91**, 1508-1522.
- Antoni-Zimmermann D. & P. Hahn.** 1997. Gebinde- und Filmkonservierung von wäßrigen Siliconharz-Beschichtungssystemen. In: Schultze W., ed. *Wässrige Siliconharz-Beschichtungssysteme für Fassaden*. Renningen: Expert-Verlag, 379-406.
- Appelt H.** 1973. Fellstrukturuntersuchungen an Wasserspitzmäusen. *Abhandlungen und Berichte des Naturkundlichen Museum "Mauritianum" Altenburg* **8**, 81-87.
- Archibald P.A.** 1990. Soil Algae. In: Dindal D.L., ed. *Soil Biology Guide*. New York: John Wiley & Sons, 69-96.
- Ariño X.** 1996. Factors affecting the colonization and distribution of cyanobacteria, algae and lichens in ancient mortars. In: Riederer J., ed. *Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone : Berlin, 30. Sept. - 4. Oct. 1996*. Berlin: Möller, 725-731.
- Ariño X. & C. Saiz-Jimenez.** 1996. Colonization and deterioration processes in Roman mortars by cyanobacteria, algae and lichens. *Aerobiologia* **12**, 9-18.
- Artus G.R.J., S. Jung, J. Zimmermann, H.-P. Gautschi, K. Marquardt & S. Seeger.** 2006. Silicone Nanofilaments and Their Application as Superhydrophobic Coatings. *Advanced Materials* **18**, 2758-2762.
- Aussillous P. & D. Quéré.** 2001. Liquid marbles. *Nature* **411**, 924-927.
- Aussillous P. & D. Quéré.** 2004. Shapes of rolling liquid drops. *Journal of Fluid Mechanics* **512**, 133-151.
- Aust H.J.** 1981. Über den Verlauf von Mehltäuepidemien innerhalb des Agroökosystems Gerstenfeld. *Acta Phytomedica* **7**, 1-76.

- Aylor D.E.** 1978. Dispersal in time and space: aerial pathogens. In: Horsfall J.G., Cowling E.B., eds. *Plant disease: an advanced treatise*, Vol. 2. New York: Academic Press, 159-180.
- Bagda E., G. WühlCouturier & W. Lindner.** 1999. Algen und Pilzen auf Fassadenbeschichtungen auf der Spur. *Farbe und Lack* **3**, 106-115.
- Bahadur V. & S.V. Garimella.** 2007. Electrowetting-Based Control of Static States on Rough Surfaces. *Langmuir* **23**, 4918-4924.
- Bainbridge A. & O.J. Stedman.** 1979. Dispersal of *Erysiphe graminis* and *Lycopodium clavatum* spores near to the source in barley crop. *Annals of Applied Biology* **91**, 187-198.
- Baker E.A.** 1982. Chemistry and morphology of plant epicuticular waxes. In: Cutler D.F., Alvin K.L., Price C.E., eds. *The plant cuticle*, Vol. 10. London: Academic Press, 139-166.
- Baker E.A. & G.M. Hunt.** 1986. Erosion of waxes from leaf surfaces by simulated rain. *New Phytologist* **102**, 161-173.
- Baker E.A., G.M. Hunt & P.J.G. Stevens.** 1983. Studies of plant cuticle and spray droplet interactions: a fresh approach. *Pesticide science* **14**, 645-658.
- Balasubramanian A.K., A.C. Miller & O.K. Rediniotis.** 2004. Microstructured hydrophobic skin for hydrodynamic drag reduction. *AIAA Journal* **42**, 411-414.
- Baldacchini T., J.E. Carey, M. Zhou & E. Mazur.** 2006. Superhydrophobic surfaces prepared by microstructuring of silicon using a femtosecond laser. *Langmuir* **22**, 4917-4919.
- Baltus R.** 1999. Handschrifterkennungssystem mit Touch-Pad mit nahezu unverschmutzbarer Schreib- und Tastfläche. DE 29919018 U1, 1-3.
- Bargel H., K. Koch, Z. Cerman & C. Neinhuis.** 2006. Evans Review No. 3: Structure-function relationships of the plant cuticle and cuticular waxes - a smart material. *Functional Plant Biology* **33**, 893-910.
- Barthlott W.** 1990. Scanning electron microscopy of the epidermal surface in plants. In: Claugher D., ed. *Application of the scanning EM in taxonomy and functional morphology*. Oxford: Clarendon Press, 69-94.
- Barthlott W.** 1998. Self-cleaning surfaces of objects and process for producing same. Germany: Patent, EP 0772514 B1, 8.
- Barthlott W. & N. Ehler.** 1977. Raster-Elektronenmikroskopie der Epidermis-Oberflächen von Spermatophyten. *Tropische und Subtropische Pflanzenwelt* **19**, 367-467.
- Barthlott W. & E. Wollenweber.** 1981. Zur Feinstruktur, Chemie und taxonomischen Signifikanz epicuticularer Wachse und ähnlicher Sekrete. *Tropische und Subtropische Pflanzenwelt* **32**, 7-67.
- Barthlott W. & C. Neinhuis.** 1997. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* **202**, 1-8.
- Barthlott W. & C. Neinhuis.** 2000. Method for producing self-cleaning detachable surfaces. Germany: Patent, WO 00/58410, 9.
- Barthlott W. & C. Neinhuis.** 2001. The lotus effect: nature's model for self cleaning surfaces. *International Textile Bulletin* **1**, 9-12.
- Barthlott W., C. Neinhuis, D. Cutler, F. Ditsch, I. Meusel, I. Theisen & H. Wilhelmi.** 1998. Classification and terminology of plant epicuticular waxes. *Botanical Journal of the Linnean Society* **126**, 237-260.
- Bartolo D., F. Bouamrène, E. Verneuil, A. Buguin, P. Silberzan & S. Moulinet.** 2006. Bouncing or sticky droplets: impalement transitions on micropatterned surfaces. *Europhysics Letters* **74**, 299-305.
- Baumann L.-H.** 1979. Verbreitung von Algen durch Luftströmungen. PhD, Freie Universität Berlin, Berlin, 169.
- Baumann M., G. Sakoske, L. Poth & G. Tünker.** 2003. Learning from the lotus flower - selfcleaning coatings on glass. In: Days G.P., ed. *Proceedings of the 8th international glass conference in Tampere: Glass Processing Days*, 330-333.

- Baumann M., K.-D. Fritsche, D. Korbelaar, S. Ludwig & L. Poth.** 2001. Selbstreinigende Lackbeschichtungen und Verfahren und Mittel zur Herstellung derselben. Germany: DE 10106213 A1.
- Baumann M., K.-D. Fritsche, D. Korbelaar, S. Ludwig & L. Poth.** 2002. Self-cleaning paint coating and a method and agent for producing the same. Deutschland: WO 02/064266 A2, 22.
- Bélanger R.R., W.R. Bushnell, A.J. Dik & T.L.W. Carver.** 2002. *The Powdery Mildews: A Comprehensive Treatise*. Minnesota: The American Phytopathological Society, 292.
- Benedix R., F. Dehn, J. Quaas & M. Orgass.** 2000. Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning building materials. *Lacer* **5**, 157-167.
- Benzi R., L. Biferale, M. Sbragaglia, S. Succi & F. Toschi.** 2006. Mesoscopic modelling of heterogeneous boundary conditions for microchannel flows. *Journal of Fluid Mechanics* **548**, 257-280.
- Berim G.O. & E. Ruckenstein.** 2005. Microscopic interpretation of the dependence of the contact angle on roughness. *Langmuir* **21**, 7743-7751.
- Bhushan B. & Y.C. Jung.** 2006. Micro- and nanoscale characterization of hydrophobic and hydrophilic leaf surfaces. *Nanotechnology* **17**, 2758-2772.
- Bhushan B. & M. Nosonovsky.** 2006. Hydrophobic surface with geometric roughness pattern. USA: Patent, US 2006/0078724 A1, 13.
- Bico J., C. Marzolin & D. Quéré.** 1999. Pearl drops. *Europhysics Letters* **47**, 220-226.
- Bico J., U. Thiele & D. Quéré.** 2002. Wetting of textured surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **206**, 41-46.
- Blaich J.** 1999. Bauphysikalische Aspekte des Algenbewuchses auf Fassaden und Maßnahmen zur Vermeidung. In: Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V., ed. *Typische Bauschäden an Außenbauteilen und ihre Auswirkungen - technisch, optisch, finanziell, rechtlich - und erfolgreiche Vermeidungsstrategien*. Darmstadt: IBK, 1-9.
- Blakeman J.P.** 1980. Behavior of Conidia on Aerial Plant Surfaces. In: Coley-Smith J.R., Verhooff K., Jarvis W.R., eds. *The Biology of Botrytis*. London: Academic Press Inc. Ltd, 115-151.
- Blakeman J.P. & P. Atkinson.** 1976. Evidence for a spore germination inhibitor co-extracted with wax from leaves. In: Dickinson C.H., Preece T.F., eds. *Microbiology of aerial plant surfaces*: Academic Press, 441-449.
- Blakeman J.P. & P. Atkinson.** 1981. Antimicrobial substances associated with the aerial surfaces of plants. In: Blakeman J.P., ed. *Microbial ecology of the phylloplane*. London [u.a.]: Academic Press, 245-263.
- Blossey R.** 2003. Self-cleaning surfaces - virtual realities. *Nature Materials* **2**, 301-306.
- Bock E. & W. Sand.** 1993. The microbiology of masonry biodeterioration. *Journal of Applied Bacteriology* **74**, 503-514.
- Bolhar-Nordenkamp H.R. & G. Öquist.** 1993. Chlorophyll fluoreszenz as a tool in photosynthesis research. In: Hall D.O., ed. *Photosynthesis and Production in a Changing Environment: Field and Laboratory Manual*. London: Chapman & Hall, 193-206.
- Bonser R.H.C.** 2006. Patented biologically-inspired technological innovations: A twenty year view. *Journal of Bionic Engineering* **3**, 39-41.
- Bormashenko E., T. Stein, G. Whyman, Y. Bormashenko & R. Pogreb.** 2006. Wetting Properties of the Multiscaled Nanostructured Polymer and Metallic Superhydrophobic Surfaces. *Langmuir* **22**, 9982-9985.
- Bormashenko E., Y. Bormashenko, T. Stein, G. Whyman, R. Pogreb & Z. Barkay.** 2007. Environmental Scanning Electron Microscopy Study of the Fine Structure of the Triple Line Cassie-Wenzel Wetting Transition for Sessile Drops Deposited on Rough Polymer Substrates. *Langmuir* **23**, 4378-4382.
- Born A. & J. Ermuth.** 1999. Copyright by nature: Neue Micro-Siliconharzfarbe mit Lotuseffekt für trockene und saubere Fassaden. *Farbe & Lack* **105**, 96-104.

- Born A. & M. Abdou.** 2003. Untersuchungen zum Einfluss einer Fassadenbeschichtung mit Lotus-Effect^(c) nach Barthlott auf den Besiedlungsgrad von Fassaden mit Algen, Schimmelpilzen und Bakterien. In: Venzmer H., ed. *Algen an Fassadenbaustoffen II*, Vol. 5/6. Berlin: Huss-Medien GmbH, 199-206.
- Born A., R. Wink & J. Ermuth.** 1999. Form- oder Beschichtungsmaterial und dessen Verwendung. Germany: DE 19921876 A1, 1-5.
- Born A., J. Ermuth & C. Neinhuis.** 2000. Fassadenfarbe mit Lotus-Effekt: Erfolgreiche Übertragung bestätigt. *Phänomen Farbe* **2**, 34-36.
- Bowling R.A.** 1988. A theoretical review of particle adhesion. In: Mittal K.L., ed. *Particles on Surfaces: detection, adhesion, and removal (Proceedings of a Symposium on Particles on Surfaces : detection, adhesion, and removal ; July 28 - August 2, 1986, in San Francisco, California)*, Vol. 1. New York [u.a.]: Plenum Press, 129-142.
- Boyer J.S., S.C. Wong & G.D. Farquhar.** 1997. CO₂ and water vapor exchange across leaf cuticle (epidermis) at various water potentials. *Plant Physiology* **114**, 185-191.
- Bradley D.J., G.S. Gilbert & I.M. Parker.** 2003. Susceptibility of clover species to fungal infection: the interaction of leaf surface traits and environment. *American Journal of Botany* **90**, 857-864.
- Braun U.** 1995. *The powdery mildews (Erysiphales) of Europe*. Jena Stuttgart New York: Gustav Fischer Verlag, 338.
- Brennenstuhl A.M. & P.E. Doherty.** 1991. The economic impact of microbiologically influenced corrosion at Ontario Hydro's Nuclear Power Plants. In: Dowling N.J., Mittelman M.W., Danco J.C., eds. *Microbiologically influenced corrosion and biodeterioration*. Knoxville, Tennessee, 7.5-7.10.
- Brewer C.A. & W.K. Smith.** 1997. Patterns of leaf surface wetness for montane and subalpine plants. *Plant, Cell and Environment* **20**, 1-11.
- Brewer C.A., W.K. Smith & T.C. Vogelmann.** 1991. Functional interaction between leaf trichomes, leaf wettability and the optical properties of water droplets. *Plant, Cell and Environment* **14**, 955-962.
- Brill H.** 1990. Mikrobielle Materialzerstörung von Wandanstrichen und Klebstoffen. *Werkstoffe und Korrosion* **41**, 69-72.
- Brill H.** 1994. Mikrobielle Werkstoffzerstörung-Schadensfälle und Gegenmaßnahmen: Allgemeine Schutzmaßnahmen vor biogener Materialzerstörung. *Werkstoffe und Korrosion* **45**, 147-151.
- Brill H., ed.** 1995. *Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz : Schädigungsmechanismen und Schutzmaßnahmen*. Jena [u.a.]: G. Fischer, 290.
- Broady P.A.** 1979. Wind dispersal of terrestrial algae at Signy Island, South Orkney Islands. *British Antarctic Survey Bulletin* **48**, 99-102.
- Brodie H.J.** 1945. Further observations on the mechanism of germination of the conidia of various species of powdery mildew at low humidity. *Canadian Journal of Research* **C 23**, 198-211.
- Brodie H.J. & C.C. Neufeld.** 1942. The development and structure of the conidia of *Erysiphe polygoni* DC. and their germination at low humidity. *Canadian Journal of Research* **C 20**, 41-62.
- Brown R.M., D.A. Larson & H.C. Bold.** 1964. Airborne algae: Their abundance and heterogeneity. *Science* **143**, 583-585.
- Büchli R. & P. Raschle.** 2004. *Algen und Pilze an Fassaden: Ursachen und Vermeidung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 112.
- Büchsel M., M. Kaußen & S. Schroft.** 2002. Selbstreinigende und antiadhäsive Papiere und papierartige Materialien sowie Verfahren zu deren Herstellung. Germany: DE 101 06494 A 1.
- Bukovac M.J., J.A. Flore & E.A. Baker.** 1979. Peach leaf surfaces: changes in wettability, retention, cuticular permeability, and epicuticular wax chemistry during expansion with special

reference to spray application. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **104**, 611-617.

Bukovac M.J., J.M. Leon, J.A. Cooper, R.E. Whitmoyer, D.L. Reichard & R.D. Brazee. 1995. Spray droplet: plant surface interaction and deposit formation as related to surfactants and spray volume. In: Gaskin R.E., ed. *Fourth International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals*. New Zealand Forest Research Institute, Rotorua, New Zealand, 177-185.

Bundessortenamt. 2002. *Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Ölf Früchte, Leguminosen (großkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln)*. Hannover: Deutscher Landwirtschaftsverlag

Burton Z. & B. Bhushan. 2005. Hydrophobicity, adhesion, and friction properties of nanopatterned polymers and scale dependence for micro- and nanoelectromechanical systems. *Nano Letters* **5**, 1607-1613.

Burton Z. & B. Bhushan. 2006. Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces. *Ultramicroscopy* **106**, 709-719.

Burt I.H. & J.M. Ichida. 2006. Selection for feather structure. *Acta Zoologica Sinica* **52**, 131-135.

Bush J.W.M. & D.L. Hu. 2006. Walking on water: Biocomotion at the Interface. *Annual Review of Fluid Mechanics* **38**, 339-369.

Buzágh A. & E. Wolfram. 1956. Bestimmung der Haftfähigkeit von Flüssigkeiten an festen Körpern mit der Abreißwinkelmethode. *Colloid & Polymer Science* **149**, 125.

Buzágh A. & E. Wolfram. 1957. Bestimmung der Haftfähigkeit von Flüssigkeiten an festen Körpern mit der Abreißwinkelmethode. II. *Kolloid-Zeitschrift* **157**, 50-53.

Byrne J.M., M.K. Hausbeck & B.D. Shaw. 2000. Factors affecting concentrations of airborne conidia of *Oidium* sp. among poinsettias in a greenhouse. *Plant Disease* **84**, 1089-1095.

Cadotte M.W., J.A. Drake & T. Fukami. 2005. Constructing nature: laboratory models as necessary tools for investigating complex ecological communities. In: Desharnais R., Caswell H., eds. *Population Dynamics and Laboratory Ecology*, Vol. 37. London: Academic Press Ltd., 400.

Callies M. & D. Quéré. 2005. On water repellency. *Soft Matter* **1**, 55-61.

Callow M.E. 2000. Algal biofilms. In: Evans L.V., ed. *Biofilms: Recent advances in their study and control*. Amsterdam: Harwood Academic, 189-209.

Cao L., H.-H. Hu & D. Gao. 2007. Design and Fabrication of Micro-textures for Inducing a Superhydrophobic Behavior on Hydrophilic Materials. *Langmuir* **23**, 4310-4314.

Carbone G. & L. Mangialardi. 2005. Hydrophobic properties of a wavy rough substrate. *The European Physical Journal E* **16**, 67-76.

Carlile M.J. & S.C. Watkinson. 1994. *The fungi*. London [u.a.]: Academic Press, 482.

Carver T.L.W. & E. Griffith. 1981. Relationship between powdery mildew infection, green leaf area and grain yield of barley. *Annals of Applied Biology* **99**, 255-266.

Carver T.L.W. & W.R. Bushnell. 1983. The probable role of primary germ tubes in water uptake before infection by *Erysiphe graminis*. *Physiological Plant Pathology* **23**, 229-240.

Carver T.L.W. & S.M. Ingerson. 1987. Responses of *Erysiphe graminis* germings to contact with artificial and host surfaces. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **30**, 359-372.

Carver T.L.W. & B.J. Thomas. 1990. Normal germling development by *Erysiphe graminis* on cereal leaves freed of epicuticular wax. *Plant Pathology* **39**, 367-375.

Carver T.L.W. & S.J. Gurr. 2006. Filamentous fungi on plant surfaces. In: Riederer M., Müller C., eds. *Biology of the Plant Cuticle*, Vol. 23. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 368-397.

Carver T.L.W., B.J. Thomas & S.M. Ingerson-Morris. 1995a. The surface of *Erysiphe graminis* and the production of extracellular material at the fungus - host interface during germling and colony development. *Canadian Journal of Botany* **73**, 272-287.

- Carver T.L.W., S.M. Ingerson & B.J. Thomas.** 1996. Influences of host surface features on development of *Erysiphe graminis* and *Erysiphe pisi*. In: Kerstiens G., ed. *Plant cuticles*. Oxford: BIOS Scientific Publishers Ltd., 255-266.
- Carver T.L.W., S.M. Ingerson-Morris, B.J. Thomas & R.J. Zeyen.** 1995b. Early interactions during powdery mildew infection. *Canadian Journal of Botany* **73**, Suppl. **1**, 632-639.
- Cassie A.B.D. & S. Baxter.** 1944. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society* **40**, 546-551.
- Celio G.J. & M.K. Hausbeck.** 1997. Conidial germination, infection structure formation, and early colony development of powdery mildew on poinsettia. *Phytopathology* **88**, 105-113.
- Cerman Z., A.K. Stosch & W. Barthlott.** 2004. Der Lotus-Effekt®: Selbstreinigende Oberflächen und ihre Übertragung in die Technik. *Biologie in unserer Zeit* **34**, 290-296.
- Cerman Z., W. Barthlott & J. Nieder.** 2005. *Erfindungen der Natur. Bionik - Was wir von Pflanzen und Tieren lernen können*. Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag, 281.
- Characklis W.G. & P.A. Wilderer, eds.** 1989. *Structure and function of biofilms*. Chichester, New York [u.a.]: John Wiley & Sons, 387.
- Chen G., Q. Cong, Y. Feng & L. Ren.** 2004. Study on the wettability and self-cleaning of butterfly wing surfaces. In: Collins M.W., Brebbia C.A., eds. *Design and nature II*, 245-251.
- Chen H., F. Zhang, S. Fu & X. Duan.** 2006. In situ microstructure control of oriented layered double hydroxide monolayer films with curved hexagonal crystals as superhydrophobic materials. *Advanced Materials* **18**, 3089-3093.
- Chen S., C. Hu, L. Chen & N. Xu.** 2007. Facile fabrication of superhydrophobic surface from micro/nanostructure metal alkanethiolate based films. *Chemical Communications*, 1919-1921.
- Chen W., A.Y. Fadeev, M.C. Hsieh, D. Öner, J. Youngblood & T.J. McCarthy.** 1999. Ultrahydrophobic and Ultralyophobic Surfaces: Some Comments and Examples. *Langmuir* **15**, 3395-3399.
- Chen Y.C., B. He, J. Lee & N.A. Patankar.** 2005. Anisotropy in the wetting of rough surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science* **281**, 458-464.
- Cheng Y.T., D.E. Rodak, C.A. Wong & C.A. Hayden.** 2006. Effects of micro- and nano-structures on the self-cleaning behaviour of lotus leaves. *Nanotechnology* **17**, 1359-1362.
- Cheng Y.-T. & D.E. Rodak.** 2005. Is the lotus leaf superhydrophobic? *Applied Physics Letters* **86**, 1-3.
- Cheng Y.-T., D.E. Rodak, A. Angelopoulos & T. Gacek.** 2005. Microscopic observations of condensation of water on lotus leaves. *Applied Physics Letters* **87**, 1-3.
- Cherewick W.J.** 1944. Studies on the biology of *Erysiphe graminis* DC. *Canadian Journal of Research C* **22**, 52-86.
- Cho W.K., S.M. Kang, D.J. Kim, S.H. Yang & I.S. Choi.** 2006. Formation of superhydrophobic surfaces by biomimetic silicification and fluorination. *Langmuir* **22**, 11208-11213.
- Choi C.-H. & C.-J. Kim.** 2006. Large slip of aqueous liquid flow over a nanoengineered superhydrophobic surface. *Physical Review Letters* **96**, 4.
- Chow T.S.** 2003. Size-dependent adhesion of nanoparticles on rough substrates. *Journal of physics: Condensed Matter* **15**, L83-L87.
- Chow T.S.** 2007. Nanoscale surface roughness and particle adhesion on structures substrates. *Nanotechnology* **18**, 4.
- Christensen B.E. & W.G. Characklis.** 1990. Physical and chemical properties of biofilms. In: Characklis W.G., Marshall K.C., eds. *Biofilms*. New York: John Wiley, 93-130.
- Christoffer J. & K.W. Hoffmann.** 1989. Meteorologische Daten zur Oberflächenbeeinflussung. In: Bagda E., ed. *Umwelteinflüsse auf Oberflächen. Belastungs- und Abbaumechanismen in Abhängigkeit von Umwelt- und Klimaeinflüssen*, Vol. 282. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verlag, 1-18.

- Ciferri O.** 1999. Microbial Degradation of Paintings. *Applied and Environmental Microbiology* **65**, 879-885.
- Clanet C., C. Béguin, D. Richard & D. Quéré.** 2004. Maximal deformation of an impacting drop. *Journal of Fluid Mechanics* **517**, 199-208.
- Cleugh H.A., J.M. Miller & M. Böhm.** 1998. Direct mechanical effects of wind on crops. *Agroforestry Systems* **41**, 85-112.
- Cong Q., G.-H. Chen, Y. Fang & L.-Q. Ren.** 2004. Super-hydrophobic characteristics of butterfly wing surface. *Journal of Bionic Engineering* **1**, 249-255.
- Costerton J.W.** 2004. A short history of the development of the biofilm concept. In: Ghannoum M., O`Toole G.A., eds. *Microbial Biofilms*. Washington, 4-19.
- Cottin-Bizonne C., J.-L. Barrat, L. Bocquet & E. Charlaix.** 2003. Low friction flows of liquids at nanopatterned interfaces. *Nature Materials* **2**, 238.
- Coulson S.R., I.S. Woodward & J.P.S. Badyal.** 2000a. Ultralow surface energy plasma polymer films. *Chemical Materials* **12**, 2031-2038.
- Coulson S.R., I.S. Woodward, J.P.S. Badyal, S.A. Brewer & C. Willis.** 2000b. Super-repellent composite fluoropolymer surfaces. *Journal of Physical Chemistry B* **104**, 8836-8840.
- Cox C.S. & C.M. Wathes, eds.** 1995. *Bioaerosols handbook*. Boca Raton, London, Tokyo: Lewis Publishers, 621.
- Crisp D.J.** 1963. Waterproofing mechanisms in animals and plants. In: Moilliet J.L., ed. *Waterproofing and water-repellency*. New York: Elsevier, 416-481.
- Crisp D.J.** 1964. Plastron respiration. In: Danielli J.F., Punkhurst K.G.A., Riddiford A.C., eds. *Recent Progress in Surface Science*, Vol. 2. New York, London: Academic Press, 377-425.
- Crisp D.J. & W.H. Thorpe.** 1948. The water-protecting properties of insect hairs. *Discussions of the Faraday Society* **3**, 210-220.
- Daley P.F., K. Raschke, J.T. Ball & J.A. Berry.** 1989. Topography of photosynthetic activity of leaves obtained from video images of chlorophyll fluorescence. *Plant Physiology* **90**, 1233-1238.
- Daoud W.A., J.H. Xin & X. Tao.** 2004. Superhydrophobic Silica Nanocomposite Coating by a Low-Temperature Process. *Journal of the American Ceramic Society* **87**, 1782-1784.
- Davies R.R.** 1961. Wettability and the capture, carriage and deposition of particles by raindrops. *Nature* **191**, 616-617.
- de Gennes P.-G.** 1985. Wetting: statics and dynamics. *Reviews of Modern Physics* **57**, 827-863.
- de Gennes P.-G., F. Brochard-Wyart & D. Quéré.** 2004. *Capillarity and wetting phenomena. Drops, bubbles, pearls, waves*. New York, Berlin, Heidelberg: Springer, 291.
- Deacon J.** 2006. *Fungal Biology*. Malden, USA; Oxford, UK; Carlton, Australia: Blackwell Publishing, 371.
- Dean R.A.** 1997. Signal pathways and appressorium morphogenesis. *Annual Review of Phytopathology* **35**, 211-234.
- Dendl P. & J. Interwies.** 2001. Method for imparting a self-cleaning feature to a surface, and an object provided with a surface of this type. Germany: WO 2001/079141.
- Dettre R.H. & R.E.J. Johnson.** 1964. Contact angle hysteresis. II. Contact angle measurements on rough surfaces. In: Fowkes F.M., ed. *Contact angle, wettability, and adhesion*. Washington: American Chemical Society, 136-144.
- Dickinson C.H.** 1967. Fungal colonization of Pisum leaves. *Canadian Journal of Botany* **45**, 915-927.
- Dickinson C.H.** 1976. Fungi on the aerial surfaces of higher plants. In: Dickinson C.H., Preece T.F., eds. *Microbiology of Aerial Plant Surfaces*: Academic Press, 293-323.
- Dickinson S.** 1960. The mechanical ability to breach the host barriers. In: Horstfall J.G., Dimond A.E., eds. *Plant pathology: An advanced treatise*. London: Academic Press Ltd., 293-323.

- Diehl P.** 2000. Selbstreinigender Golfschläger. Germany: DE 20001933 U1, 1-4.
- Dirauf P., W. Kiefer, A. Leuze, P. Madl & J. Rosenkranz.** 2001. Turbo-Machine and Turbine Blade. WO 0220949 A1, 1-24.
- Dix N.J. & J. Webster.** 1995. *Fungal Ecology*. London: Chapman & Hall, 549.
- Doerffer R.** 1988. Remote sensing of sunlight induced phytoplankton fluorescence. In: Lichtenthaler H.K., ed. *Application of Chlorophyllfluorescence*. Dordrecht: Kluwer, 269-274.
- Dorrer C. & J. Rühle.** 2006. Advancing and receding motion of droplets on ultrahydrophobic post surfaces. *Langmuir* **22**, 7652-7657.
- Doshi D.A., P.B. Shah, S. Singh, E.D. Branson, A.P. Malanoski, E.B. Watkins, J. Majewski, F. van Swol & C.J. Brinker.** 2005. Investigating the Interface of Superhydrophobic Surfaces in Contact with Water. *Langmuir* **21**, 7805-7811.
- Duparré A., M. Flemming, J. Steinert & K. Reihls.** 2001. Optical coatings with enhanced roughness for ultra-hydrophobic, low scatter applications. *OSA Trends in Optics and Photonics Series* **63**, TuF5/1-TuF5/3.
- Duparré A., M. Flemming, J. Steinert & K. Reihls.** 2002. Optical coatings with enhanced roughness for ultrahydrophobic, low-scatter applications. *Applied Optics-OT* **41**, 3294-3298.
- Dupuis A. & J.M. Yeomans.** 2005a. Modelling droplets on superhydrophobic surfaces: equilibrium states and transitions. *Langmuir* **21**, 17.
- Dupuis A. & J.M. Yeomans.** 2005b. Droplet dynamics on patterned substrates. *Pramana-Journal of Physics* **64**, 1019-1027.
- Dupuis A. & J.M. Yeomans.** 2006. Dynamics of sliding drops on superhydrophobic surfaces. *Europhysics Letters* **75**, 105-111.
- Dutzmann S., S. Forche, G. Döll & J. Kranz.** 1981. Licht- und Rasterelektronenmikroskopischer Vergleich von Blattoberflächen verschiedener Sommergerstensorten. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **88**, 518-524.
- Duysens L.N.M. & H.E. Sweers.** 1963. Mechanism of the two phytochemical reactions in algae as studied by means of fluorescence. In: Japanese Society of Plant Physiology, ed. *Studies on Microalgae and Photosynthetic Bacteria*. Tokyo: University Tokyo Press, 353-372.
- Eckhardt F.E.W., ed.** 1991. *Bakterien, Pilze und Algen als Verwitterungsfaktoren für Denkmale aus Stein und mineralische Baustoffe*. Hannover: Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland, 28-30.
- Eckhardt F.E.W.** 1994. Mikrobielle Vielfalt auf Werkstoffen und Besiedlungswege. *Werkstoffe und Korrosion* **45**, 152-156.
- Eckhardt F.E.W.** 1996. Microbial diversity and airborne contamination. In: Heitz E., Flemming H.-C., Sand W., eds. *Microbially influenced corrosion of materials: scientific and engineering aspects*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 75-95.
- Eggert A., N. Häubner, S. Klausch, U. Karsten & R. Schumann.** 2006. Quantification of algal biofilms colonising building materials: chlorophyll a measured by PAM-fluorometry as a biomass parameter. *Biofouling* **22**, 79-90.
- Ehresmann D.W. & M.T. Hatch.** 1975. Effect of Relative Humidity on the Survival of Airborne Unicellular Algae. *Applied Microbiology* **29**, 352-357.
- Ehrich S. & E. Bock.** 1996. Biogenic sulfuric acid corrosion test procedure for cement bound materials. In: Kreysa G., ed. *Biodeterioration and biodegradation. Papers of the 10th international biodeterioration and biodegradation symposium Hamburg, 15-18 september, 1996*, Vol. 133. Frankfurt am Main: VCH Verlagsgesellschaft, 193-198.
- Ehrlich H.L. & C.L. Brierley.** 1990. *Microbial mineral recovery*. New York: McGraw-Hill, 454.
- Elster J., J. Seckbach, W.F. Vincent & O. Lhotský, eds.** 2002. *Algae and extreme environments. Ecology and Physiology. Proceedings of the International Conference 11-16 September 2000 Trebon*. Berlin, Stuttgart: J. Cramer, 602.

- Engel R., U. Greiner, F. Koschwitz, A. Stingl, A. Weiss & S. Will.** 2001. Kabel sowie Verfahren zur Herstellung eines Kabels. Germany: DE 10126117 A1.
- Ensikat H.J. & W. Barthlott.** 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., M. Boese, W. Mader, W. Barthlott & K. Koch.** 2006. Crystallinity of plant epicuticular waxes: electron and X-ray diffraction studies. *Chemistry and Physics of Lipids* **144**, 45-59.
- Epstein L. & R.L. Nicholson.** 1997. Adhesion of spores and hyphae to plant surfaces. In: Carrol G.C., Tudzynski P., eds. *Plant Relationships*, Vol. 5. New York: Springer, 11-25.
- Erbil H.Y.** 2006. *Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 352.
- Erbil H.Y., A.L. Demirel, Y. Avci & O. Mert.** 2003. Transformation of a simple plastic into a superhydrophobic surface. *Science* **299**, 1377-1380.
- Erfurth U.** 2006. Feuchtehaushalt von Beschichtungen nach EN 1062 unter Berücksichtigung des nächtlichen Tauwassers. In: Venzmer H., ed. *Fassadenbiofilme*, Vol. 11. Berlin: Huss-Medien GmbH, 29-40.
- Ettl H.** 1980. "Algen". In: Ettl H., ed. *Grundriß der allgemeinen Algologie*. Stuttgart, New York: Fischer.
- Ettl H. & G. Gärtner.** 1995. *Syllabus der Luft-, Boden- und Flechtenalgen*. Stuttgart [u.a.]: Fischer, 721.
- Eul U. & E. Heitz.** 1996. Simulation and control of MIC and biofouling on metals by the miniplant technique. In: Kreysa G., ed. *Biodeterioration and biodegradation. Papers of the 10th international biodeterioration and biodegradation symposium Hamburg, 15-18 september, 1996*, Vol. 133. Frankfurt am Main: VCH Verlagsgesellschaft, 85-90.
- 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.
- Extrand C.W.** 2005. Fuel cell with ultraphobic surfaces. USA: US 6,911,276 B2, 15.
- Extrand C.W.** 2006a. Designing for optimum liquid repellency. *Langmuir*, 1711-1714.
- Extrand C.W.** 2006b. Ultraphobic surface for high pressure liquids. USA: US 6,852,390 B2, 15.
- Falkowski P. & D.A. Kiefer.** 1985. Chlorophyll a fluorescence in phytoplankton: relationship to photosynthesis and biomass. *Journal of Plankton Research* **7**, 715-731.
- Fan J.-G., X.-J. Tang & Y.-P. Zhao.** 2004. Water contact angles of vertically aligned Si nanorod arrays. *Nanotechnology* **15**, 501-504.
- FAO.** 2004. *FAO statistical yearbook. Vol. 1*. Rome: FAO, 318.
- Favali M.A., F. Fossati & M. Realini.** 2000. Biodeterioration of natural and artificial stones caused by lichens and algae. In: Sequeira C.A.C., ed. *Microbial corrosion: proceedings of the 4th International EFC Workshop*, Vol. 29. London: IOM Communications, 299-308.
- Favia P., G. Cicala, A. Milella, P. Palumbo & R. d'Agostini.** 2003. Deposition of superhydrophobic fluorocarbon coatings in modulated RF glow discharges. *Surface and Coatings Technology* **169-170**, 609-612.
- Feng L., Y. Song, J. Zhai, B. Liu, J. Xu, L. Jiang & D. Zhu.** 2003a. Creation of a superhydrophobic surface from an amphiphilic polymer. *Angewandte Chemie International Edition* **42**, 800-802.
- Feng L., Z. Yang, J. Zhai, Y. Song, B. Liu, Y. Ma, Z. Yang, L. Jiang & D. Zhu.** 2003b. Superhydrophobicity of Nanostructured Carbon Films in a wide Range of pH Values. *Angewandte Chemie* **42**, 4217-4220.

- Feng L., S. Li, Y. Li, H. Li, L. Zhang, J. Zhai, Y. Song, B. Liu, L. Jiang & D. Zhu.** 2002. Superhydrophobic surfaces: from natural to artificial. *Advanced Materials* **14**, 1857-1860.
- Feng X., L. Feng, M. Jin, J. Zhai, L. Jiang & D. Zhu.** 2004. Reversible super-hydrophobicity to super-hydrophilicity transition of aligned ZnO nanorod films. *Journal of the American Chemical Society* **126**, 62-63.
- Feng X.J. & L. Jiang.** 2006. Design and Creation of Superwetting/Antiwetting Surfaces. *Advanced Materials* **9999**, NA.
- Feng X.-Q., X. Gao, Z. Wu, L. Jiang & Q.-S. Zheng.** 2007. Superior Water Repellency of Water Strider Legs with Hierarchical Structures: Experiments and Analysis. *Langmuir* **23**, 4892-4896.
- Ferrari M., F. Ravera & L. Liggieri.** 2006. Preparation of a superhydrophobic surface by mixed inorganic-organic coating. **88**, 1-3.
- Finkenauer H. & G. Herder.** 2000. Warenpräsentationsmöbel. Germany: DE 10060330 A1.
- Fischer P.** 2000. Flüssigkeitspumpe. Germany: DE 10007340 A1.
- Fitz C., W. Hofbauer & M. Krus.** 2006. Mikrobielles Wachstum auf Fassaden - Ergebnisse einer mehrjährigen kontrollierten Freilandexposition. In: Venzmer H., ed. *Fassadenbiofilme*, Vol. 11. Berlin: Huss-Medien GmbH, 61-74.
- Flemming H.-C.** 1994. Mikrobielle Werkstoffzerstörung-Grundlagen: Ökonomisch-technischer Überblick. *Werkstoffe und Korrosion* **45**, 5-9.
- Flemming H.-C.** 1995. Biofilme und ihre Bedeutung für die mikrobielle Materialzerstörung. In: Brill H., ed. *Mikrobielle Materialzerstörung*. Stuttgart: Georg Fischer Verlag, 24-47.
- Flemming H.-C.** 1996. Economical and technical overview. In: Heitz E., Flemming H.-C., Sand W., eds. *Microbially influenced corrosion of materials: scientific and engineering aspects*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 5-14.
- Flemming H.-C.** 1998. Relevance of biofilms for the biodeterioration of surfaces of polymeric materials. *Polymer Degradation and Stability* **59**, 309-315.
- 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.
- Forster G.F.** 1977. Effect of leaf surface wax on the deposition of airborne propagules. *Transactions Of The British Mycological Society* **68**, 245-250.
- Fountain D.W.** 2000. Evading the lotus effect. *Biologist* **47**, 265-268.
- Franke W.** 1997. *Nutzpflanzenkunde: Nutzbare Gewächse der gemäßigten Breiten, Subtropen und Tropen*. Stuttgart: Thieme, 509.
- Fresnais J., L. Benyahia & F. Poncin-Epaillard.** 2006. Dynamic (de)wetting properties of superhydrophobic plasma-treated polyethylene surfaces. *Surface & Interface Analysis* **38**, 144-149.
- Friedl T.** 1998. Die Systematik und Stammesgeschichte der Grünalgen - eine Herausforderung für die Molekularbiologie. *Biologie in unserer Zeit* **28**, 246-258.
- Fujii I. & N. Hirayama.** 1999. Use of super-water-repellent fractal surfaces in the crystallization of macromolecules. *Acta Crystallographica Section D* **55**, 1247-1249.
- Fukagata K., N. Kasagi & P. Koumoutsakos.** 2006. A theoretical prediction of friction drag reduction in turbulent flow by superhydrophobic surfaces. *Physics of fluids* **18**, 1-8.
- Fukuda K., J. Tokunaga, T. Nobunaga, T. Nakatani, T. Iwasaki & Y. Kunitake.** 2000. Frictional drag reduction with air lubricant over a super-water-repellent surface. *Journal of Marine Science and Technology* **5**, 123-130.
- Fürstner R.** 2002. *Untersuchungen zum Einfluss von Struktur und Chemie auf die Benetzbarkeit und die Selbstreinigung superhydrophober Oberflächen*. Aachen: Shaker-Verlag, 151.

- Fürstner R., W. Barthlott, C. Neinhuis & P. Walzel.** 2005. Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces. *Langmuir* **21**, 956-961.
- Gao L. & T.J. McCarthy.** 2006a. The "Lotus Effect" explained: Two reasons why two length scales of topography are important. *Langmuir* **22**, 2966-2967.
- Gao L. & T.J. McCarthy.** 2006b. A perfectly hydrophobic surface ($\theta/\theta_{R} = 180^{\circ}/180^{\circ}$). *Journal of the American Chemical Society* **128**, 9052-9053.
- Gao L. & T.J. McCarthy.** 2006c. "Artificial Lotus Leaf" prepared using a 1945 patent and a commercial textile. *Langmuir* **22**, 5998-6000.
- Garrod R.P., L.G. Harris, W.C.E. Schofield, J. McGettrick, L.J. Ward, D.O. Teare & J.P.S. Badyal.** 2007. Mimicking a stenocara beetle's back for microcondensation using plasmachemical patterned superhydrophobic-superhydrophilic surfaces. *Langmuir* **23**, 689-693.
- Gaus R., M. Schweizer & K. Bär.** 2000. Verfahren zur Vor-Ort-Erzeugung einer Lotuseffekt-Beschichtung. DE 10055336 A1, 1-4.
- Gaylarde C.C., M.R. Silva & T. Warscheid.** 2003. Microbial impact on building materials: an overview. *Materials and Structures* **36**, 342-352.
- Gaylarde P.M. & C.C. Gaylarde.** 2000. Algae and cyanobacteria on painted buildings in Latin America. *International Biodeterioration & Biodegradation* **46**, 93-97.
- Genzer J. & K. Efimenko.** 2000. Creating long-lived superhydrophobic polymer surfaces through mechanically assembled monolayer. *Science* **290**, 2130-2133.
- Genzer J. & K. Efimenko.** 2006. Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review. *Biofouling* **22**, 339-360.
- Gerstel P., R. Hoffmann, P. Lipowsky, L.P.H. Ljeurgens, J. Bill & F. Aldinger.** 2006. Mineralization from Aqueous Solutions of Zinc Salts Directed by Amino Acids and Peptides. *Chemistry of Materials* **18**, 179-186.
- Glaser J.K.** 1998. Biozide. In: Bieleman J., ed. *Lackadditive*: Wiley-VCH, 325-345.
- Gogte S., P. Vorobieff, R. Truesdell, A. Mammoli, F. van Swol, P. Shah & C.J. Brinker.** 2005. Effective slip on textured superhydrophobic surfaces. *Physics of fluids* **17**, 051701.
- Göltner-Spickermann C.** 2003. Silikat-Replikas für das biologisch inspirierte Materialdesign. *Nachrichten aus der Chemie* **51**, 1036-1040.
- Gould P.** 2003. Smart, clean surfaces. *materials today* **6**, 44-48.
- Grace J. & M.A. Collins.** 1976. Spore liberation from leaves by wind. In: Dickinson C.H., Preece T.F., eds. *Microbiology of aerial plant surfaces*: Academic Press, 185-198.
- Granick S., Y. Zhu & H. Lee.** 2003. Slippery questions about complex fluids flowing past solids. *Nature Materials* **2**, 221-227.
- Green J.R., T.L.W. Carver & S.J. Gurr.** 2002. The formation and function of infection and feeding structures. In: Bélanger R.R., Bushnell W.R., Dick A.J., Carver T.L.W., eds. *The Powdery Mildews: A Comprehensive Treatise*. St. Paul (Minnesota): APS Press, 66-82.
- Gregory P.H.** 1957. Electrostatic charges on spores of fungi in air. *Nature* **180**, 330-330.
- Gregory P.H.** 1971. The leaf as a spore trap. In: Preece T.F., Dickinson C.H., eds. *Ecology of leaf surface microorganisms*: Academic Press, 239-243.
- Gregory P.H.** 1973. *The microbiology of the atmosphere*. London: Leonard Hill Books, 377.
- Gros G.** 2001. Mittel zur Herstellung von selbstreinigenden dünnen Oberflächenbeschichtungen und dafür geeignete Verfahren. Germany: WO 01/19932 A2.
- Groß F., M. Mennig, P.W. Oliveira, H. Schmidt & S. Sepeur.** 1999. Mit einer mikrostrukturierten Oberfläche versehene Substrate, Verfahren zu ihrer Herstellung und ihre Verwendung. Germany: DE 19917366 A1, 1-7.
- Gu Z.-Z., H. Uetsuka, K. Takahashi, R. Nakajima, H. Onishi, A. Fujishima & O. Sato.** 2003. Structural Color and the Lotus Effect. *Angewandte Chemie* **115**, 922-925.

- Guillitte O. & R. Dreesen.** 1995. Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tolls of building materials. *The science of the total environment* **167**, 365-374.
- Günther I. & G.B. Wortmann.** 1966. Dust on the surface of leaves. *Journal of Ultrastructure Research* **15**, 522-527.
- Guo Z., F. Zhou, J.-C. Hao & W. Liu.** 2005. Stable biomimetic super-hydrophobic engineering materials. *Journal of American Chemical Society* **127**, 15670-15671.
- Guo Z., F. Zhou, J.-C. Hao, Y.-M. Liang, W.-M. Liu & W.T.S. Huck.** 2006. "Stick and slide" ferrofluidic droplets on superhydrophobic surfaces. *Applied Physics Letters* **89**, 3.
- Guo Z., J. Fang, J.-C. Hao, Y.-M. Liang & W.-M. Liu.** 2006. A Novel Approach to Stable Superhydrophobic Surfaces. *ChemPhysChem* **7**, 1674-1677.
- Gysau D. & S. Franke.** 2001. Formulierungsparameter zur Steuerung des Wasserabperleffekts von Fassadenfarben. Oftringen: Omya AG, 13.
- Habets W.J.A.** 2003. Hydrophobic coatings comprising reactive nano-particles. Niederlande: EP 1 479 738 A1, 1-22.
- Haffer J.** 1985. Familie Cinclidae - Wasseramseln. In: Glutz von Blotzenheim U.N., Bauer K.M., eds. *Handbuch der Vögel Mitteleuropas. Bd. 10/II, Passeriformes.* 956-1020, 956-1020.
- Haines B.L., J.A. Jernstedt & H.S. Neufeld.** 1985. Direct foliar effect of acid rain. II. Leaf surface characteristics. *New Phytologist* **99**, 407-416.
- Hall D.M. & W. Burke.** 1974. Wettability of leaves of a selection of New Zealand plants. *New Zealand Journal of Botany* **12**, 283-298.
- Halter H.D.** 1997. Algenbewuchs an hochwärmegedämmten Fassaden. *Baubiologie*, 20-21.
- Han J.T., X. Xu & K. Cho.** 2005a. Diverse access to artificial superhydrophobic surfaces using block copolymers. *Langmuir* **21**, 6662-6665.
- Han J.T., S.H. Kim & A. Karim.** 2007. UVO- tunable superhydrophobic to superhydrophilic wetting transition an biomimetic nanostructured surfaces. *Langmuir* **23**, 2608-2614.
- Han J.T., D.H. Lee, C.Y. Ryu & K. Cho.** 2004. Fabrication of Superhydrophobic Surface from a Supramolecular Organosilane with Quadruple Hydrogen Bonding. *Journal of American Chemical Society* **129**, 4796-4797.
- Han J.T., Y. Zheng, J. Ho Cho, X. Xu & K. Cho.** 2005b. Stable superhydrophobic organic-inorganic hybrid films by electrostatic self-assembly. *Journal of Physical Chemistry B* **109**, 20773-20778.
- Han J.T., Y. Jang, D.Y. Lee, J.H. Park, S.-H. Song, D.-Y. Ban & K. Cho.** 2005c. Fabrication of a bionic superhydrophobic metal surface by sulfur-induced morphological development. *Journal of materials chemistry* **15**, 3089 - 3092.
- Han W., D. Wu, W. Ming, H.J.W. Niemantsverdriet & P.C. Thüne.** 2006. Direct catalytic route to superhydrophobic polyethylene films. *Langmuir* **22**, 7956-7959.
- Harris J.G. & J.G. Manners.** 1983. Influence of relative humidity on germination and disease development in *Erysiphe graminis*. *Transactions Of The British Mycological Society* **81**, 605-611.
- Hartley G.S. & R.T. Brunskill.** 1958. Reflection of water drops from surfaces. In: Danielli J.F., Pankhurst K.G.A., Riddiford A.C., eds. *Surface phenomena in chemistry and biology.* London [u.a.]: Pergamon Press, 214-223.
- Hau B.** 1985. Epidermiologische Simulatoren als heuristische und operationale Instrumente der Systemanalyse mit besonderer Berücksichtigung eines Modells des Gerstenmehltaus. *Acta Phytomedica* **9**, 1-101.
- Häubner N., R. Schumann & U. Karsten.** 2006. Aeroterrestrial Microalgae Growing in Biofilms on Facades - Response to Temperature and Water Stress. *Microbial Ecology* **51**, 285-293.
- He B., N.A. Patankar & J. Lee.** 2003. Multiple equilibrium droplet shapes and design criterion for rough hydrophobic surfaces. *Langmuir* **19**, 4999-5003.

- Heitz E., H.-C. Flemming & W. Sand.** 1996. Introduction. In: Heitz E., Flemming H.-C., Sand W., eds. *Microbially influenced corrosion of materials: scientific and engineering aspects*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1-2.
- Hennig A., K. Grundke, R. Frenzel & M. Stamm.** 2002. Ultrahydrophobic surfaces: relation between roughness and contact angle hysteresis. *Tenside, surfactants, detergents* **39**, 243-246.
- Henoch C., T.N. Krupenkin, P. Kolodner, J.A. Taylor, M.S. Hodes & A.M. Lyons.** 2006. Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces. In: Breuer K., ed. *3rd AIAA Flow Control Conference, 5 - 8 June 2006, San Francisco, CA*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA Paper 2006-3192.
- Herminghaus S.** 2000. Roughness-induced non-wetting. *Europhysics Letters* **52**, 165-170.
- Hilge C., K. Petersen & W.E. Krumbein.** 1998. Auswirkungen von UV-Bestrahlung und Ozon auf die Stoffwechselaktivität von Gestein und Putz besiedelnden Organismen. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* **12**, 162-173.
- Hinton H.E.** 1976. Plastron respiration in bugs and beetles. *Journal of Insect Physiology* **22**, 1529-1550.
- Hirsch P.** 1986. Microbial Life At Extremely Low Nutrient Levels. *Advances in Space Research* **6**, 287-298.
- Hirsch U.T.** 1998. Super hydrophobic coated substrates. Germany: EP 1 115 903 A1.
- Hirst J.M.** 1953. Changes in atmospheric spore content: Diurnal periodicity and the effects of weather. *Transactions of British Mycological Society* **36**, 375-393.
- Hirst J.M. & O.J. Stedman.** 1963. Dry liberation of fungus spores by raindrops. *Journal of general microbiology* **33**, 335-344.
- Hladik M.** 2003. Was trocken bleibt, bleibt algenfrei. *Ausbau + Fassade* **4**, 28-30.
- Hoch H.C. & R.C. Staples.** 1991. Signaling for infection structure formation in fungi. In: Cole G.T., Hoch H.C., eds. *The fungal spore and disease initiation in plants and animals*. New York: Plenum Press, 25-46.
- Höcker H.** 2002. Plasma treatment of textile fibres. *Pure and applied chemistry* **74**, 423-427.
- Hoffman L.** 1989. Algae of terrestrial habitats. *The botanical review* **55**, 77-105.
- Holdgate M.W.** 1955. The Wetting of Insect Cuticles by Water. *Journal of Experimental Biology* **32**, 591-617.
- Holloway P.J.** 1969a. The effects of superficial wax on leaf wettability. *Annals of applied biology* **63**, 145-153.
- Holloway P.J.** 1969b. Chemistry of leaf waxes in relation to wetting. *Journal of the science of food and agriculture* **20**, 124-128.
- 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: Preece T.F., Dickinson C.H., eds. *Ecology of leaf surface micro-organisms*. New York London: Academic Press, 39-53.
- Hölter H. & J. Eichmeier.** 1999a. Schmutz- und keimabweisende Lotus-Oberflächenbeschichtung für Klimakanäle und Klimaanlage. Germany: DE 19932080 A1.
- Hölter H. & J. Eichmeier.** 1999b. Schmutz- und keimabweisende Lotus-Oberflächenbeschichtung für Solarzellen-Panels. Germany: DE 19932150 A1.
- Holthuis U.** 1989. Einfluß morphologischer Strukturen der Blattepidermis von Sommergerste auf Haftung, Infektion und Befall mit *Erysiphe graminis* f. sp. *hordei*. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **96**, 494-507.
- Holthuis U., H. Könnig, C. Boyle & H.J. Aust.** 1990. Keimung, Haftung und Infektionseffizienz von *Erysiphe graminis* DC. f. sp. *tritici* und *hordei* auf Getreide unter dem Einfluß natürlicher und künstlicher Niederschläge und anaerober Bedingungen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **97**, 608-621.

- Hongu T. & G.O. Philips.** 1990. *Super-Microft* Based on the Structure of a Lotus Leaf. *New Fibers*. London, 93-96.
- Hopton J.W.** 1988. Physical conditions and microbial growth: some implications for biodeterioration. In: Houghton D.R., Smith R.N., Eggins H.O.W., eds. *Biodeterioration 7*. London, New York: Elsevier Applied Science, 511-516.
- Hosono E., S. Fujihara, I. Honma & H. Zhou.** 2005. Superhydrophobic Perpendicular Nanopin Film by the Bottom-Up Process. *Journal of the American Chemical Society* **127**, 13458-13459.
- Howard R.J.** 1997. Breaching the outer barriers - cuticle and cell wall penetration. In: Carroll G., Tudzynski P., eds. *The Mycota: Plant relationships*, Vol. 5 Part A. Berlin: Springer, 43-60.
- Hozumi A. & O. Takai.** 1998. Preparation of silicon oxide films having a water-repellent layer by multiple-step microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Thin Solid Films* **334**, 54-59.
- Hsieh C.-T., J.-M. Chen, Y.-H. Huang, R.-R. Kuo, C.-T. Li, H.-C. Shih, T.-S. Lin & C.-F. Wu.** 2006. Influence of fluorine/carbon atomic ratio on superhydrophobic behavior of carbon nanofiber arrays. *Journal of Vacuum Science & Technology B* **24**, 113-117.
- Hüster R.** 1997. Mikrobielle Materialzerstörung. In: Schultze W., ed. *Wässrige Siliconharz-Beschichtungssysteme für Fassaden*, Vol. 522. Renningen: Expert-Verlag, 358-378.
- Hutterer R. & T. Hürter.** 1981. Adaptive Haarstrukturen bei Wasserspitzmäusen (Insectivora, Soricinae). *Zeitschrift für Säugetierkunde* **46**, 1-11.
- Ingold C.T.** 1978. Water and spore liberation. In: Kozlowski T.T., ed. *Water and plant disease*, Vol. 5. New York [u.a.]: Academic Press, 119-140.
- Ingold C.T. & H.J. Hudson.** 1993. *The Biology of Fungi*. London: Chapman & Hall, 224.
- Jarvis W.R. & K. Slingsby.** 1977. The control of powdery mildew of greenhouse cucumber by water spray and *Ampelomyces quisqualis*. *Plant Disease Reporter* **61**, 728-730.
- Jatzek M., C. Messal & R. Schumann.** 2002. Mikroalgen auf nachträglich wärmegeämmten Plattenbauten der Insel Rügen. *Bauphysik* **24**, 305-307.
- Jeffree C.E.** 1986. The cuticle, epicuticular waxes and trichomes of plants, with reference to their structure, function and evolution. In: Juniper B.E., Southwood S.R., eds. *Insects and the plant surface*. London: Edward Arnold, 23-63.
- Jeffree C.E.** 2006. The fine structure of the plant cuticle. In: Riederer M., Müller C., eds. *Biology of the plant cuticle*. Oxford: Blackwell Publishing, 11-125.
- Jeffree C.E., E.A. Baker & P.J. Holloway.** 1975. Ultrastructure and recrystallization of plant epicuticular waxes. *New Phytologist* **75**, 539-549.
- Jeong H.E., S.H. Lee, J.K. Kim & K.Y. Suh.** 2006. Nanoengineered multiscale hierarchical structures with tailored wetting properties. *Langmuir* **22**, 1640-1645.
- Ji J., J. Fu & J. Shen.** 2006. Fabrication of a superhydrophobic surface from the amplified exponential growth of a multilayer. *Advanced Materials* **18**, 1441-1444.
- Jiang L., Y. Zhao & J. Zhai.** 2004a. A lotus-leaf-like superhydrophobic surface: a porous microsphere/nanofiber composite film prepared by electrohydrodynamics. *Angewandte Chemie International Edition* **43**, 4338-4341.
- Jiang Y., Z. Wang, X. Yu, F. Shi, H. Xu & X. Zhang.** 2004b. Self-assembled monolayers of dendron thiols for electrodeposition of gold nanostructures: toward fabrication of superhydrophobic/superhydrophilic surfaces and pH-responsive surfaces. *Langmuir* **21**, 1986-1990.
- Jin M., X. Feng, L. Feng, T. Sun, J. Zhai, T. Li & L. Jiang.** 2005. Superhydrophobic aligned polystyrene nanotube films with high adhesive force. *Advanced Materials* **17**, 1977-1981.
- Johnson R.E.J. & R.H. Dettre.** 1964. Contact angle hysteresis. I. Study of an idealized rough surface. In: Fowkes F.M., ed. *Contact angle, wettability, and adhesion*, Vol. 43. Washington: American Chemical Society, 112-135.

- Jopp J., H. Gröll & R. Yerushalmi-Rozen.** 2004. Wetting behavior of water droplets on hydrophobic microtextures of comparable size. *Langmuir* **20**, 10015-10019.
- Joseph P., C. Cottin-Bizonne, J.-M. Benoit, C. Ybert, C. Journet, P. Tabeling & L. Bocquet.** 2006. Slippage of water past superhydrophobic carbon nanotube forests in microchannels. *Physical Review Letters* **97**, 4.
- Journet C., S. Moulinet, C. Ybert, S.T. Purcell & L. Bocquet.** 2005. Contact angle measurement on superhydrophobic Carbon Nanotube Forests: effect of fluid pressure. *Europhysics Letters* **71**, 104-109.
- Jung D.-H., I.J. Park, Y.K. Choi, S.-B. Lee, H.S. Park & J. Rühle.** 2002. Perfluorinated polymer monolayers on porous silica for materials with super liquid repellent properties. *Langmuir* **18**, 6133-6139.
- Jung Y.C. & B. Bhushan.** 2006. Contact angle, adhesion and friction properties of micro-and nanopatterned polymers for superhydrophobicity. *Nanotechnology* **17**, 4970-4980.
- Juniper B.E.** 1991. The leaf from the inside and the outside: a microbe's perspective. In: Andrews J.H., Hirano S.S., eds. *Microbial ecology of leaves*. New York, Berlin, Heidelberg: Springer, 21-42.
- Juniper B.E. & G.C. Cox.** 1973. The anatomy of the leaf surface: the first line of defence. *Pesticide science* **4**, 543-561.
- Kako T., A. Nakajima, H. Irie, Z. Kato, K. Uematsu, T. Watanabe & K. Hashimoto.** 2004. Adhesion and sliding of wet snow on a super-hydrophobic surface with hydrophilic channels. *Journal of Materials Science* **39**, 547-555.
- Kaltenegger K. & J. Kiefer.** 1999. Isolator. Deutschland: Patent, DE 19944954A1, 2.
- Karsten U., S. Eixler, S. Görs & R. Schumann.** 2003. Klimawandel und der mögliche Einfluss auf das Algenwachstum. In: Venzmer H., ed. *Algen an Fassadenbaustoffen II*, Vol. 5/6. Berlin: Huss-Medien GmbH, 51-58.
- Karsten U., R. Schumann, N. Häubner & T. Friedl.** 2005. Lebensraum Fassade. *Biologie in unserer Zeit* **35**, 20-30.
- Kassner E.M., S. Nemat-Nasser, Z. Suo, G. Bao, J.C. Barbour, L.C. Brinson, H. Espinosa, H. Gao, S. Granick, P. Gumbsch, K.-S. Kim, W. Knauss, L. Kubin, J. Langer, B.C. Larson, L. Mahadevan, A. Majumdar, S. Torquato & F. van Swol.** 2003. New directions in mechanics. *Mechanics of Materials* **37**, 231-259.
- Kastien H.K.** 2004. Algen und Pilze im Brennpunkt der Diskussionen. In: Dolt P., ed. *Algen, Pilze, Fassaden*. Geislingen: C. Maurer Druck und Verlag, 71-80.
- Kastien H.K.** 1999a. Algen und Pilze an mineralischen Fassaden. *Fassade* **8**, 57-62.
- Kastien H.K.** 1999b. Algen und Pilze an mineralischen Fassaden. 1. Teil. *aplica* **106**, 28-32.
- Kautsky H. & A. Hirsch.** 1931. Neue Versuche zur Kohlensäureassimilation. *Naturwissenschaften* **19**, 964.
- Kawai A. & H. Nagata.** 1994. Wetting behavior of liquid on geometrical rough surface formed by photolithography. *Japanese Journal of Applied Physics* **33**, 1283-1285.
- Keller H., F. Reiner & C. Neinhuis.** 2002. Verwendung von Apparaten mit schwer benetzbaren Oberflächen. DE 10057319 A1.
- Kerner von Marilaun A.J.** 1913. *Pflanzenleben*. Leipzig, Wien: Bibliographisches Institut
- Kerstins G.** 1996. *Plant cuticles and integrated functional approach*. Lancaster, LA4YQ: BIOS Scientific Publishers Ltd., 337.
- Khorasani M.T. & H. Mirzadeh.** 2004. In vitro blood compatibility of modified PDMS surfaces as superhydrophobic and superhydrophilic materials. *Journal of Applied Polymer Science* **91**, 2042-2047.
- Kiefer D.A., W.S. Chamberlin & C.R. Booth.** 1989. Natural fluorescence of chlorophyll a: relationship to photosynthesis and chlorophyll concentration in the western South Pacific gyre. *Limnology and Oceanography* **34**, 868-881.

- Kijlstra J., K. Reihls & A. Klamt.** 2002. Roughness and topology of ultra-hydrophobic surfaces. *Colloids and Surfaces A* **206**, 521-529.
- Kim J. & C.-J. Kim.** 2002. Nanostructured surfaces for dramatic reduction of flow resistance in droplet-based microfluidics. In: IEEE, ed. *Proceedings of the Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 20-24 Jan. 2002, Las Vegas*. Washington, D.C.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 479-482.
- Kim M., K. Kim, N.Y. Lee, K. Shin & Y.S. Kim.** 2007. A simple fabrication route to a highly transparent super-hydrophobic surface with a poly(dimethylsiloxane) coated flexible mold. *Chemical Communications*.
- Kim S.H., J.-H. Kim, B.-K. Kang & H.S. Uhm.** 2005. Superhydrophobic CF_x coating via in-line atmospheric RF plasma of He-CF₄-H₂. *Langmuir* **21**, 12213-12217.
- Klein J.** 2000. Smart polymer solutions. *Nature* **405**, 745-747.
- Klein R.J., P.M. Biesheuvel, B.C. Yu, C.D. Meinhart & F.F. Lange.** 2003. Producing superhydrophobic surfaces with nano-silica spheres. *Zeitschrift für Metallkunde* **94**, 12.
- Kobrin G., ed.** 1993. *A Practical Manual on Microbiologically Influenced Corrosion*. Houston, Texas: NACE International, 233.
- Koch K., A. Domnisse & W. Barthlott.** 2006a. 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., D. Hartmann, L. Schreiber, W. Barthlott & C. Neinhuis.** 2004. Influences of air humidity during the cultivation of plants on wax chemical composition, morphology and leaf surface wettability. *Environmental and Experimental Botany* **56**, 1-9.
- Koch K., W. Barthlott, S. Koch, A. Hommes, K. Wandelt, W. Mamdouh, S. De-Feyter & P. Broekmann.** 2006b. Structural analysis of wheat wax (*Triticum aestivum*, c.v. 'Naturastar' L.): from the molecular level to three dimensional crystals. *Planta* **223**, 258-270.
- Köhl J. & N.J. Fokkema.** 1994. Fungal interactions on living and necrotic leaves. In: Blakeman J.P., Williamson B., eds. *Ecology of plant pathogens*. Wallingford: CAB International, 321-334.
- Köhler D.** 1991. Notes on the diving behaviour of the water shrew, *Neomys fodiens* (Mammalia, Soricidae). *Zoologischer Anzeiger* **227**, 218-228.
- Kolattukudy P.E.** 1985. Enzymatic penetration of the plant cuticle by fungal pathogens. *Annual Review of Phytopathology* **23**, 223-250.
- Kolattukudy P.E., R. Croteau & J.S. Bruckner.** 1976. Biochemistry of plant waxes. In: Kolattukudy P.E., ed. *Chemistry and biochemistry of natural waxes*. Amsterdam New York: Elsevier, 289-347.
- Köller W.** 1991. The plant cuticle. In: Cole G.T., Hoch H.C., eds. *The fungal spore and disease initiation in plants and animals*. New York: Plenum Press, 219-246.
- Krasovitski B. & A. Marmur.** 2005. Particle adhesion to drops. *The Journal of Adhesion* **81**, 869-880.
- Krause G.H. & E. Weis.** 1991. Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. *Annual Reviews of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **42**, 313-349.
- Kristiansen J.** 1996. Dispersal of freshwater algae - a review. *Hydrobiologia* **336**, 151-157.
- Krupenkin T.N., J.A. Taylor, T.M. Schneider & S. Yang.** 2004. From rolling ball to complete wetting: the dynamic tuning of liquids on nanostructured surfaces. *Langmuir* **20**, 3824-3827.
- Krus M., D. Rösler & K. Sedlbauer.** 2006. Mikrobielles Wachstum auf Fassaden - Hygrothermische Modellierung. In: Venzmer H., ed. *Fassadenbiofilme*, Vol. 11. Berlin: Huss-Medien GmbH, 115-127.
- Kumar R. & A.V. Kumar.** 1999. *Biodeterioration of stone in tropical environments: an overview*: The Getty Conservation Institute, 85.
- Kunoh H.** 1981. Early stages of infection process of *Erysiphe graminis* on barley and wheat. In: Blakeman J.P., ed. *Microbial ecology of the phylloplane*. London: Academic Press, 85-101.

- Kunoh H., R.L. Nicholson & I. Kobayashi.** 1991. Extracellular materials of structures: their significance at prepenetration stages of infection. In: Mendgen K., ed. *Electron Microscopy of Plant Pathogens*. Berlin: Springer, 223-234.
- Kunoh H., R.L. Nicholson & T.L.W. Carver.** 2001. Adhesion of fungal spores and effects on plant cells. In: Keen N.T., Mayama S., Leach J.E., Tsuyumu S., eds. *Delivery and Perception of Pathogen Signals in Plants*. St. Paul: American Phytopathological Society, 25-35.
- Kunoh H., N. Yamaoka, H. Yoshioka & R.L. Nicholson.** 1988. Preparation of the infection court by *Erysiphe graminis*. I. Contact-mediated changes in morphology of the conidium surface. *Experimental Mycology* **12**, 325-335.
- Kunoh H., R.L. Nicholson, H. Yosioka, N. Yamaoka & I. Kobayashi.** 1990. Preparation of the infection court by *Erysiphe graminis*: Degradation of the host cuticle. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **36**, 397-407.
- Künzel H.M.** 2001. Algen an Fassaden. Ein Ergebnis sauberer Luft. *Deutsches Architektenblatt* **33**, 60-62.
- Künzel H.M.** 2000. Heutige Beanspruchung von Tondachziegeln und Betondachsteinen bei Dachdeckungen. *IBP-Mitteilung* **27**.
- Künzel H.M. & K. Sedlbauer.** 2001. Algen auf Wärmedämm-Verbundsystemen. *IBP-Mitteilungen*. Holzkirchen: Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 1-2.
- Künzel H.M., M. Krus & K. Sedlbauer.** 2001. Algen auf Außenwänden - Bauphysik als Ursache? Bauphysik als Lösung! In: Venzmer H., ed. 3. *Dahlberg Kolloquium "Mikroorganismen und Bauwerkinstandsetzung"*. Wismar: Verlag Bauwesen, 38-47.
- Künzel H.M., T. Schmidt & A. Holm.** 2002. Exterior Surface Temperature of Different Wall Constructions: Comparison of Numerical Simulation and Experiment. *Proceedings 11. Symposium for Building Physics*. Dresden, 441-449.
- Kuzych I.J. & W.F. Meggitt.** 1983. Alteration of epicuticular wax structure by surfactants. *Micron and Microscopia Acta* **14**, 279-280.
- Kwong V.H., M.A. Mossman & L.A. Whitehead.** 2004. Control of reflectance of liquid droplets by means of electrowetting. *Applied Optics* **43**, No. 4, 808-813.
- Lafuma A. & D. Quéré.** 2003. Superhydrophobic states. *Nature Materials* **2**, 457-460.
- Lai S.C.S.** 2003. Mimicking nature: Physical basis and artificial synthesis of the Lotus-effect. Leiden (NL): University Leiden, 1-31.
- Lambda Physik GmbH.** 1998. Progress towards sub-100 nm lithography at MIT's Lincoln Laboratory. *Lambda Highlights*, Vol. 54, 1-5.
- Langowski H.C.** 2002. Flexible Materialien mit ultrahohen Barriereigenschaften. *Vakuum in Forschung und Praxis* **14**, 297-302.
- Lappan U., K. Lunkwitz, S. Schmidt, F. Simon, D. Scharnweber, M. Thieme, H. Worch, R. Frenzel, A. Lenk & M. Panzner.** 2000. Ultraphobe Oberflächen, Verfahren zu deren Herstellung sowie Verwendung. Germany: DE 10028772 A1, 1-4.
- Lau K.K., J. Bico, K.B.K. Teo, M. Chhowalla, G.A.J. Amaratunga, W.I. Milne, G.H. McKinley & K.K. Gleason.** 2003. Superhydrophobic carbon nanotube forests. *Nano Letters*.
- Leach C.M. & J.D. Apple.** 1984. Leaf surface electrostatics: Behavior of detached leaves of beans, maize, and other plants under natural conditions. *Phytopathology* **74**, 704-709.
- Leadbeater B.S.C. & M.E. Callow.** 1992. Formation, composition and physiology of algal biofilms. In: Melo L.F., Bott T.R., Fletcher M., Capdeville B., eds. *NATO Advanced Study Institute on Biofilms - Science and Technology*. Alvor, Portugal: Kluwer Academic Publishers, 149-162.
- Lee J., B. He & N.A. Patankar.** 2005. A roughness-based wettability switching membrane device for hydrophobic surfaces. *Journal of micromechanics and microengineering* **15**, 591-600.
- Lee S.-M. & T.H. Kwon.** 2006. Mass-producible replication of highly hydrophobic surfaces from plant leaves. *Nanotechnology* **17**, 3189-3196.

- Lee S.-M., H.S. Lee, D.S. Kim & T.H. Kwon.** 2006. Fabrication of hydrophobic films replicated from plant leaves in nature. *Surface and Coatings Technology* **201**, 553-559.
- Lee W., M.-K. Jin, W.-C. Yoo & J.-K. Lee.** 2004. Nanostructuring of a Polymeric Substrate with Well-Defined Nanometer-Scale Topography and Tailored Surface Wettability. *Langmuir* **20**, 7665-7669.
- Lejeune M., L.M. Lacroix, F. Brétagneol, A. Valsesia, P. Colpo & F. Rossi.** 2006. Plasma-based processes for surface wettability modification. *Langmuir* **22**, 3057-3061.
- Leveau J.H.J.** 2006. Microbial communities in the phyllosphere. In: Riederer M., Müller C., eds. *Biology of the Plant Cuticle*, Vol. 23. Oxford: Blackwell Publishing, 334-367.
- Lewis L.A. & M. McCourt.** 2004. Green algae and the origin of land plants. *American Journal of Botany* **91**, 1535-1556.
- Li M., J. Zhai, H. Liu, Y. Song, L. Jiang & D. Zhu.** 2003. Electrochemical deposition of conductive superhydrophobic zinc oxide thin films. *The journal of physical chemistry B* **107**, 9954-9957.
- Li S., H. Li, X. Wang, Y. Song, Y. Liu, L. Jiang & D. Zhu.** 2002. Super-hydrophobicity of large-area honeycomb-like aligned carbon nanotubes. *The journal of physical chemistry B* **106**, 9274-9276.
- Li W. & A. Amifazli.** 2005. A thermodynamic approach for determining the contact angle hysteresis for superhydrophobic surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science* **292**, 195-201.
- Li X., Z. Cao, F. Liu, Z. Zhang & H. Dang.** 2006a. A novel method of preparation of superhydrophobic nanosilica in aqueous solution. *Chemistry letters* **35**, 94-95.
- Li X.-M., D. Reinhoudt & M. Creco-Calama.** 2007. What do we need for a superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces. *Chemical Society Reviews*.
- Li Y., W. Cai, B. Cao, G. Duan, F. Sun, C. Li & L. Jia.** 2006b. Two-dimensional hierarchical porous silicia film and its tunable superhydrophobicity. *Nanotechnology* **17**, 238-243.
- Li Y., X.J. Huang, S.H. Heo, C.C. Li, Y.K. Choi, W.P. Cai & S.O. Cho.** 2006c. Superhydrophobic bionic surfaces with hierarchical microsphere/SWCNT composite arrays. *Langmuir* **23**, 2169-2174.
- Lichtenthaler H.K.** 1988. Remote sensing of chlorophyll fluorescence in oceanography and in terrestrial vegetation: an introduction. In: Lichtenthaler H.K., ed. *Application of Chlorophyll Fluorescence*. Dordrecht: Kluwer, 287-297.
- Lifton V.A. & S. Simon.** 2005. A Novel Battery Architecture Based on Superhydrophobic Nanostructured Materials. *Nanotechnology* **2**, 726-729.
- Lighthart B. & A.J. Mohr, eds.** 1994. *Atmospheric microbial aerosols : theory and applications*. New York, London: Chapman & Hall, 397.
- Lindner D., M.J. Biehler & M. Stohrer.** 1997. Wirksamkeit verschiedener Bekämpfungsmethoden gegen Schimmelpilze. *ARCONIS* **2**, 38-41.
- Lindner W.** 2005. Surface coatings. In: Paulus W., ed. *Directory of microbicides for the protection of materials*. Dordrecht: Springer, 347-375.
- Linskens H.F.** 1950. Quantitative Bestimmung der Benetzbarkeit von Blattoberflächen. *Planta* **38**, 591-600.
- Linskens H.F.** 1952. Über die Änderung der Benetzbarkeit von Blattoberflächen und deren Ursache. *Planta* **41**, 40-51.
- Liu H., J. Zhai & J. Lei.** 2006a. Wetting and anti-wetting on aligned carbon nanotube films. *Soft Matter* **2**, 811-821.
- Liu H., L. Feng, J. Zhai, L. Jiang & D. Zhu.** 2004. Reversible wettability of a chemical vapor deposition prepared ZnO film between superhydrophobicity and superhydrophilicity. *Langmuir* **20**, 5659-5661.

- Liu Y., X. Chen & J.H. Xin. 2006b. Super-hydrophobic surfaces from a simple coating method: a bionic nanoengineering approach. *Nanotechnology* **17**, 3259-3263.
- Liu Y., Z. Ji, Q. Tang, L. Jiang, H. Li, M. He, W. Hu, D. Zhang, L. Jiang, X. Wang, C. Wang, Y. Liu & D. Zhu. 2005. Particle-size control and patterning of a charge-transfer complex for nanoelectronics. *Advanced Materials* **17**, 2953-2957.
- López-Bautista J.M., F. Rindi & D. Guiry. 2006. Molecular systematics of the subaerial green algal morphological and molecular data. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **56**, 1709-1715.
- Love J.C., B.D. Gates, D.B. Wolfe, K.E. Paul & G.M. Whitesides. 2002. Fabrication and Wetting Properties of Metallic Half-Shells with Submicron Diameters. *Nano Letters* **2**, 891-894.
- Lownds N.K. & M.J. Bukovac. 1988. Studies on octylphenoxy surfactants: V. toxicity to cowpea leaves and effects of spray application parameters. *Journal of American Society of Horticultural Science* **113**, 205-210.
- Lu X., J. Zhang, C. Zhang & Y. Han. 2005. Low-Density Polyethylene (LPDE) Surface with a Wettability Gradient by Tuning its Microstructures. *Macromolecular Rapid Communications* **26**, 637-642.
- Lundgren M., N.L. Allan & T. Cosgrove. 2007. Modeling of wetting: a study of nanowetting at rough and heterogeneous surfaces. *Langmuir* **23**, 1187-1194.
- Lundgren M., N.L. Allan, T. Cosgrove & N. George. 2003. Molecular dynamics study of wetting of a pillar surface. *Langmuir ASAP Article*.
- Lundström A.N. 1884. *Pflanzenbiologische Studien: Die Anpassung der Pflanzen an Regen und Thau*. Upsala: Lundenquistsche Buchhandlung
- Lutzoni F., F. Kauff, C.J. Cox, D. McLaughlin, G. Celio, B. Dentinger, M. Padamsee, D. Hibbett, T.Y. James, E. Baloch, M. Grube, V. Reeb, V. Hofstetter, C. Schoch, A.E. Arnold, J. Miadlikowska, J. Spatafora, D. Johnson, S. Hambleton, M. Crockett, R. Shoemaker, G.-H. Sung, R. Lücking, T. Lumbsch, K. O'Donnell, M. Binder, P. Diederich, D. Ertz, C. Gueidan, K. Hansen, R.C. Harris, K. Hosaka, Y.-W. Lim, B. Matheny, H. Nishida, D. Pfister, J. Rogers, A. Rossmann, I. Schmitt, H. Sipman, J. Stone, J. Sugiyama, R. Yahr & R. Vilgalis. 2004. Assembling the fungal tree of life: Progress, classification, and evolution of subcellular traits. *American Journal of Botany* **91**, 1446-1480.
- Luzinov I., P. Brown, G. Chumanov & S. Minko. 2004. Ultrahydrophobic fibers: Lotus approach. National Textile Center, 1-10
- Ma M., Y. Mao, M. Gupta, K.K. Gleason & G.C. Rutledge. 2005. Superhydrophobic fabrics produced by electrospinning and chemical vapor deposition. *Macromolecules* **38**, 9742-9748.
- Madden L.V. 1992. Rainfall and the dispersal of fungal spores. In: Andrews J.H., Tommerup I., eds. *Advances in Plant Pathology*, Vol. 8. London [u.a.]: Academic Press, 39-79.
- Magner J. & H. Diehl. 1999. Prüfung des Verschmutzungsverhaltens verschiedener Fassadenfarben gemäß Methode "Lotus-Effekt". Kriftel: Polymer Institut, 47.
- Mahadevan L. 2001. Non-stick water. *Nature* **411**, 895-896.
- Mahadevan L. & Y. Pomeau. 1999. Rolling droplets. *Physics of fluids* **11**, 2449-2453.
- Main C.E. & J.M. Davis. 1989. Epidemiology and biometeorology of tobacco blue mold. In: MacKeen W.E., ed. *Blue mold of tobacco*. St. Paul, Minn.: APS Press, 201-215.
- Mandrioli P. 1998. Basic aerobiology (Review). *Aerobiologia* **14**, 89-94.
- Manners J.G. & S.M.M. Hossain. 1963. Effects of temperature and humidity on conidial germination in *Erysiphe graminis*. *Transactions Of The British Mycological Society* **46**, 225-234.
- Mansch R. & E. Bock. 1996. Simulated chemical and microbiological weathering of natural stone compared to data from outdoor exposure experiments. In: Kreysa G., ed. *Biodeterioration and biodegradation. Papers of the 10th international biodeterioration and biodegradation symposium Hamburg, 15-18 september, 1996*, Vol. 133. Frankfurt am Main: VCH Verlagsgesellschaft, 161-167.

- 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. Underwater superhydrophobicity: Theoretical Feasibility. *Langmuir* **22**, 1400-1402.
- Marmur A.** 2006b. Super-hydrophobicity fundamentals: implications to biofouling prevention. *Biofouling* **22**, 107-115.
- Marte O. & M. Hochstrasser.** 2005. Charakterisierung von "Lotus"-strukturierten Faser- und Gewebeerflächen. *Melliand Textilberichte* **10**, 746-750.
- Martin J.T.** 1964. Role of cuticle in the defense against plant disease. *Annual Review of Phytopathology* **2**, 81-100.
- Martin J.T. & B.E. Juniper.** 1970. *The Cuticles of Plants*. London: Edward Arnold
- Martines E., K. Seunarine, H. Morgan, N. Gadegaard, C.D.W. Wilkinson & O. Riehle.** 2005. Superhydrophobicity and superhydrophilicity of regular nanopatterns. *Nano Letters* **5**, 2097-2103.
- Maxwell K. & G.N. Johnson.** 2000. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *Journal of Experimental Biology* **51**, 659-668.
- McHale G., N.J. Shirtcliffe & M.I. Newton.** 2004a. Contact-angle hysteresis on superhydrophobic surfaces. *Langmuir* **20**, 10146-10149.
- McHale G., N.J. Shirtcliffe & M.I. Newton.** 2004b. Super-hydrophobic and super-wetting surfaces: Analytical potential? *The Analyst* **129**, 284-287.
- McHale G., N.J. Shirtcliffe, S. Aqil, C.C. Perry & M.I. Newton.** 2004c. Topography driven spreading. *Physical Review Letters* **93**, 4.
- McHale G., S. Aqil, N.J. Shirtcliffe, M.I. Newton & H.Y. Erbil.** 2005. Analysis of droplet evaporation on a superhydrophobic surface. *Langmuir* **21**.
- McHale G., D.L. Herbertson, S.J. Elliott, N.J. Shirtcliffe & M.I. Newton.** 2006. Electrowetting of Nonwetting liquids and liquid marbles. *Langmuir* **23**, 918-924.
- McLauchlin M.L., D. Yang, P. Aella, A.A. Garcia, S.T. Picraux & M.A. Hayes.** 2007. Evaporative Properties and Pinning Strength of Laser-Ablated, Hydrophilic Sites on Lotus-Leaf-like, Nanostructured Surfaces. *Langmuir* **23**, 4871-4877.
- Meguro A., K. Fujita, H. Kunoh, T.L.W. Carver & R.L. Nicholson.** 2001. Release of the extracellular matrix from conidia of *Blumeria graminis* in relation to germination. *Mycoscience* **42**, 201-209.
- Mendgen K., M. Hahn & H. Deising.** 1996. Morphogenesis and mechanisms of penetration by plant pathogenic fungi. *Annual Review of Phytopathology* **34**, 367-386.
- Merchán V.M.** 1984. Einfluss von Klimafaktoren insbesondere der Blattnäse auf den Befall durch *Erysiphe graminis* DC. f. sp. *tritici* Marchal. PhD, Justus-Liebig-Universität, Gießen, 177.
- Merchán V.M. & J. Kranz.** 1985. Einfluß experimentell veränderter Feuchtigkeits- und Strahlungsbedingungen auf Weizenmehltau, *Erysiphe graminis* DC. f. sp. *tritici* Marchal. *Angewandte Botanik* **60**, 47-58.
- Merchán V.M. & J. Kranz.** 1986a. Wirkung der Blattnäse auf den asexuellen Zyklus des Weizenmehltaus *Erysiphe graminis* DC. sp. *tritici* Marchal. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **93**, 246-254.
- Merchán V.M. & J. Kranz.** 1986b. Untersuchungen über den Einfluß des Regens auf die Infektion des Weizens durch *Erysiphe graminis* DC. sp. *tritici* Marchal. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **93**, 255-261.

- Merchán V.M. & J. Kranz.** 1986c. Die Wirkung des Regens auf die Entwicklung des Weizenmehltaus (*Erysiphe graminis* DC. f. sp. *tritici* Marchal). *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **93**, 262-270.
- Messal C.** 2006. Von der Langzeitbewitterung zum 24-Stunden-Schnelltest: Erfahrungen mit der Epifluoreszenzmikroskopie bei der Prüfung von Fassadenbaustoffen. In: Venzmer H., ed. *Algen auf Fassaden*, 6. *Dahlberg-Kolloquium*, Vol. 11. Wismar: Huss-Medien GmbH, 163-174.
- Metting B.** 1981. The systematics and ecology of soil algae. *The Botanical Review* **47**, 195-312.
- Metting B.** 1990. Soil Algae. In: Lynch J.M., ed. *The Rhizosphere*. Chichester: John Wiley & Sons, 355-368.
- Ming W., D. Wu, R. van Benthem & G. de With.** 2005. Superhydrophobic films from raspberry-like particles. *Nano Letters* **5**, 2298-2301.
- Miwa M., A. Nakajima, A. Fujishima, K. Hashimoto & T. Watanabe.** 2000. Effects of the Surface Roughness on Sliding Angles of Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces. *Langmuir* **16**, 5754-5760.
- Miyauchi Y., B. Ding & S. Shiratori.** 2006. Fabrication of a silver-ragwort-leaf-like superhydrophobic micro/nanoporous fibrous mat surface by electrospinning. *Nanotechnology* **17**, 5151-5156.
- Mock U., R. Förster, W. Menz & J. Rühe.** 2005. Towards ultrahydrophobic surfaces: a biomimetic approach. *Journal of physics: Condensed Matter* **17**, S639-648.
- Mohammadi R., J. Wassink & A. Amirfazli.** 2004. Effect of surfactants on wetting of superhydrophobic surfaces. *Langmuir* **20**, 9657-9662.
- Møller E.B.** 2002a. Surface properties to keep the building envelope dry and warm. In: Gustavsen A., Thue J.V., eds. *Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 859-866.
- Møller E.B.** 2002b. Dirt on exterior surfaces of the building envelope. In: Gustavsen A., Thue J.V., eds. *Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 829-836.
- Moriura N., Y. Matsuda, W. Oichi, S. Nakashima, T. Hirai, T. Nonomura, K. Kakutani, S. Kusakari, K. Higashi & H. Toyoda.** 2006. An apparatus for collecting total conidia of *Blumeria graminis* f.sp. *hordei* from leaf colonies using electrostatic attraction. *Plant Pathology* **55**, 367-374.
- Morra M., E. Occhiello & F. Garbassi.** 1989. Contact angle hysteresis in oxygen plasma treated poly(tetrafluoroethylene). *Langmuir* **5**, 872-876.
- Morton L.H.G. & S.B. Surman.** 1994. Biofilms in Biodeterioration - a review. *International Biodeterioration & Biodegradation* **34**, 203-221.
- Motornov M., S. Minko, M. Nitschke, K. Grundke & M. Stamm.** 2002. Hierachically structured self-adaptive surfaces. *Polymer Preprints* **43**, 379-380.
- Motzke G.** 2004. Algen- und Pilzbefall - Ein rechtliches Zuordnungsproblem unter Berücksichtigung des neuen Sachmangelbegriffs der Schuldrechtsmodernisierung. In: Dolt P., ed. *Algen, Pilze, Fassaden*. Geislingen: C. Maurer Druck und Verlag, 7-24.
- Mount M.S. & R.S. Slesinski.** 1971. Characterization of primary development of powdery mildew. In: Preece T.F., Dickinson C.H., eds. *Ecology of leaf surface microorganisms*. London, New York: Academic Press, 301-322.
- Müller E. & W. Loeffler.** 1992. *Mykologie - Grundriß für Naturwissenschaftler und Mediziner*. Stuttgart: Thieme, 367.
- Müller F. & P. Winter.** 2004. Clean surfaces with the lotus-effect. *Jornadas comite espanol de la detergencia* **34**, 103-111.
- Murase H. & T. Fujibayashi.** 1997. Characterization of molecular interfaces in hydrophobic systems. *Progress in Organic Coatings* **31**, 97-104.

- Murase H., K. Nanishi, H. Kogure, T. Fijibayashi, K. Tamura & N. Haruta.** 1994. Interactions Between Heterogeneous Surfaces of Polymers and Water. *Journal of Applied Polymer Science* **54**, 2051-2062.
- Nachtigall W.** 1998. *Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 320.
- Nachtigall W. & D. Neumann.** 1993. Analyse & Bewertung zukünftiger Technologien, Technologieanalyse Bionik. Düsseldorf: VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, 1-123.
- Nakajima A.** 2004. Design of a transparent hydrophobic coating. *Journal of the ceramic society of japan* **112**, 533-540.
- Nakajima A., K. Hashimoto & T. Watanabe.** 2001. Recent studies on super-hydrophobic films. *Monatshefte für Chemie* **132**, 31-41.
- Nakajima A., A. Fujishima, K. Hashimoto & T. Watanabe.** 1999. Preparation of transparent superhydrophobic boehmite and silica films by sublimation of aluminum acetylacetonate. *Advanced Materials* **11**, 1365-1368.
- Nakajima A., K. Hashimoto, T. Watanabe, K. Takai, G. Yamauchi & A. Fujishima.** 2000. Transparent superhydrophobic thin films with self-cleaning properties. *Langmuir* **16**, 7044-7047.
- Narhe R.D. & D.A. Beysens.** 2004. Nucleation and Growth on a Superhydrophobic Grooved Surface. *Physical Review Letters* **93**, 1-4.
- Narhe R.D. & D.A. Beysens.** 2006. Water condensation on an super-hydrophobic spike surface. *Europhysics Letters* **75**, 98-104.
- Nay M.** 2002. Kann Wachstum von Algen und Pilzen an wärmegeprägten Fassaden verhindert werden? *Bauphysik* **24**, 39-40.
- Nay M. & P. Raschle.** 2004. Das Projekt "Algen und Pilze an Fassaden" an der EMPA in St. Gallen. In: Dolt P., ed. *Algen Pilze Fassaden*. Geislingen: C. Maurer Druck und Verlag, 37-60.
- Neinhuis C. & W. Barthlott.** 1997. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany* **79**, 667-677.
- Neinhuis C. & W. Barthlott.** 1998. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak and ginko in relation to leaf micromorphology and wettability. *New Phytologist* **138**, 91-98.
- Neinhuis C., M. Wolter & W. Barthlott.** 1992. Epicuticular wax of *Brassica oleracea*: changes of microstructure and ability to be contaminated of leaf surfaces after application of TRITON X-100. *Journal of Plant Diseases and Protection* **99**, 542-549.
- Neinhuis C., K. Koch & W. Barthlott.** 2001. Movement and regeneration of epicuticular waxes through plant cuticles. *Planta* **213**, 427-434.
- Neinhuis C., M. Wolter, T. Küppers & W. Barthlott.** 1994. Der Einfluß gasförmiger Luftschadstoffe auf die Epicuticular-Wachse von *Quercus robur*. *European Journal of Forest Pathology* **24**, 210-216.
- Netting A.G. & P. von Wettstein-Knowles.** 1973. The physico-chemical basis of leaf wettability in wheat. *Planta* **114**, 289-309.
- Nguyen Q.V.** 2001. Lotus for export to Asia. An agronomic and physiological study. Gosford (NSW, Australia): Horticultural Research & Advisory Station, 48.
- Nicholson R.L.** 1996. Adhesion of fungal propagules. In: Nicole M., Gianinazzi-Pearson V., eds. *Histology, ultrastructure and molecular cytology of plant microorganism interactions*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 117-134.
- Nicholson R.L. & L. Epstein.** 1991. Adhesion of fungi to the plant surface. In: Cole G.T., Hoch H.C., eds. *The fungal spore and disease initiation in plants and animals*. New York: Plenum Press, 3-23.
- Nicholson R.L. & H. Kunoh.** 1995. Early interactions, adhesion and establishment of the infection court by *Erysiphe graminis*. *Canadian Journal of Botany* **73, Suppl. 1**, 609-615.

- Nicholson R.L., H. Yoshioka, N. Yamaoka & H. Kunoh.** 1988. Preparation of the infection court by *Erysiphe graminis*. II. Release of esterase enzyme from conidia in response to a contact stimulus. *Experimental Mycology* **12**, 336-349.
- Nicholson R.L., H. Kunoh, T. Shiraishi & T. Yamada.** 1993. Initiation of the infection process by *Erysiphe graminis*: Conversion of the conidial surface from hydrophobicity to hydrophilicity and influence of the conidial exudate on the hydrophobicity of the barley leaf surface. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **43**, 307-318.
- Nicolas M., F. Guittard & S. Geribaldi.** 2006. Stable superhydrophobic and lipophobic conjugated polymer films. *Langmuir* **22**, 3081-3088.
- Nielsen K.A., R.L. Nicholson, T.L.W. Carver, H. Kunoh & R.P. Oliver.** 2000. First touch: an immediate response to surface recognition in conidia of *Blumeria graminis*. *Physiological & Molecular Plant Pathology* **56**, 63-70.
- Nishino T., M. Meguro, K. Nakamae, M. Matsushita & Y. Ueda.** 1999. The lowest surface free energy based on CF₃ alignment. *Langmuir* **15**, 4321-4323.
- Nitschke M., S. Uhlmann, K. Grundke, S. Minko, M. Motornov & M. Stamm.** 2002. Schaltbare Ultrahydrophobie. Dresden: Leibniz-Institut für Polymerforschung, 19-23.
- Noga G., A. Stindt & F. Lenz.** 1990. Auswirkungen von Tensid-Behandlungen auf die Anfälligkeit von *Phaseolus vulgaris* L. und *Brassica oleracea* var. *gongylodes* L. gegenüber *Botrytis cinerea*. *Gartenbauwissenschaft* **55**, 97-103.
- Noga G., M. Wolter, W. Barthlott & W. Petry.** 1991. Quantitative evaluation of epicuticular wax alterations as induced by surfactant treatment. *Angewandte Botanik* **65**, 239-252.
- Noga G.J., M. Knoche, M. Wolter & W. Barthlott.** 1987. Changes of leaf micromorphology induced by surfactant application. *Angewandte Botanik* **61**, 521-528.
- Nomura Y.** 1997. *Taxonomical study of Erysiphaceae of Japan*. Tokyo: Yokendo LTD, 281.
- Nosonovsky M. & B. Bhushan.** 2005a. Roughness optimization for biomimetic superhydrophobic surfaces. *Microsystem Technologies* **11**, 535-549.
- Nosonovsky M. & B. Bhushan.** 2005b. Wetting of rough three-dimensional superhydrophobic surfaces. *Microsystem Technologies* **12**, 273-281.
- Nosonovsky M. & B. Bhushan.** 2006. Stochastic model for metastable wetting of roughness-induced superhydrophobic surfaces. *Microsystem Technologies* **12**, 231-237.
- Nun E. & M. Oles.** 2001. Erhalt des Lotus-Effektes durch Verhinderung des Mikrobenwachstums auf selbstreinigenden Oberflächen. Germany: DE 10139574 A1.
- Nun E., M. Oles & P. Ottersbach.** 2001. Erhalt des Lotus-Effektes durch Verhinderung des Mikrobenwachstums nach Beschädigung der selbstreinigenden Oberfläche. Germany: DE 10139572 A1.
- Nun E., M. Oles & B. Schleich.** 2002. Lotus-Effect[®]-surfaces. *Macromolecular Symposia* **187**, 677-682.
- Nyström D., J. Lindqvist, E. Östmark, A. Hult & E. Malmström.** 2006. Superhydrophobic bio-fibre surfaces via tailored grafting architecture. *Chemical Communications*, 3594-3596.
- Oesterreicher W.** 1990. Ökologische Bedeutung der Algen im Boden. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* **42**, 112-126.
- Ogawa K., M. Soga, Y. Takada & I. Nakayama.** 1993. Development of a transparent and ultrahydrophobic glass plate. *Japanese Journal of Applied Physics* **32**, 614-615.
- Ogawa T., B. Ding, Y. Sone & S. Shiratori.** 2007. Super-hydrophobic surfaces of layer-by-layer structured film-coated electrospun nanofibrous membranes. *Nanotechnology* **18**, 8.
- Oles M., B. Schleich & E. Nun.** 2001a. Strukturierte Oberflächen mit Lotus-Effekt. Germany: DE 10138036 A1.
- Oles M., E. Nun & B. Schleich.** 2001b. Geometrische Formgebung von Oberflächen mit Lotus-Effekt. Germany: DE 10110589 A1.

- Oliver J.F., C. Huh & S.G. Mason.** 1977. Resistance to spreading of liquids by sharp edges. *Journal of Colloid and Interface Science* **59**, 568-581.
- Olson G.J., W.P. Iverson & F.E. Brinckman.** 1986. Disfigurement of external paint films by algae and bacteria and quantitative detection by epifluorescence microscopy. In: Barry S., Houghton D.R., eds. *Biodeterioration 6. Papers presented at the 6th international biodeterioration symposium Washington, DC, Aug., 1984*. Slough: CAB, 622-630.
- Onda T., S. Shibuichi, N. Satoh & K. Tsujii.** 1996. Super-water-repellent fractal surfaces. *Langmuir* **12**, 2125 - 2127.
- Öner D. & T.J. McCarthy.** 2000. Ultrahydrophobic surfaces. Effects of topography length scales on wettability. *Langmuir* **16**, 7777-7782.
- Oost C. & T. Domschke.** 2001. Anwendung des Lotus-Effekts in der Verfahrenstechnik. Germany: EP 1138362 A2, 1-7.
- Ortega-Calvo J.J., X. Ariño, M. Hernandez-Marine & C. Saiz-Jimenez.** 1995. Factors affecting the weathering and colonization of monuments by phototrophic microorganisms. *The science of the total environment* **167**, 329-341.
- Osawa S., M. Yabe, M. Miyamura & K. Mizuno.** 2006. Preparation of super-hydrophobic surface on biodegradable polymer by transcribing microscopic pattern of water-repellent leaf. *Polymer* **47**, 3711-3714.
- Otten A. & S. Herminghaus.** 2004. How plants keep dry: A physicist's point of view. *Langmuir* **20**, 2405-2408.
- Ou J. & J.P. Rothstein.** 2005a. Drag Reduction and μ -PIV Measurements of the Flow Past Ultrahydrophobic Surfaces. *The Society of Rheology*, Vol. 77th Annual Meeting, 1-34.
- Ou J. & J.P. Rothstein.** 2005b. Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces. *Physics of fluids* **17**, 1-10.
- Ou J., B. Perot & J.P. Rothstein.** 2004. Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces. *Physics of fluids* **16**, 4635-4643.
- Onis A., S. Evain, J. Flexas, S. Tosti & I. Moya.** 2001. Adaptation of a PAM-fluorometer for remote sensing of chlorophyll fluorescence. *Photosynthesis Research* **68 Nr.2**, 113-120.
- Pacifico J., K. Endo, S. Morgan & P. Mulvaney.** 2006. Superhydrophobic Effects of Self-Assembled Monolayers on Micropatterned Surfaces: 3-D Arrays Mimicking the Lotus Leaf. *Langmuir*.
- Pagliaro M. & R. Ciriminna.** 2005. New fluorinated materials. *Journal of materials chemistry* **15**, 4981-4991.
- Pal S., D. Roccatano, H. Weiss, H. Keller & F. Müller-Plathe.** 2005. Molecular dynamics simulation of water near nanostructured hydrophobic surfaces: interfacial energies. *ChemPhysChem*. **6**, 1641-1649.
- Palmer Jr. R.J. & P. Hirsch.** 1996. Weathered stone: biomass, community structure, and nutrients. In: Heitz E., Flemming H.-C., Sand W., eds. *Microbially influenced corrosion of materials: scientific and engineering aspects*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 297-309.
- Pandey S. & P.K. Nagar.** 2003. Patterns of leaf surface wetness in some important medicinal and aromatic plants of Western Himalaya. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* **198**, 349-357.
- Papen H., E. Zumbusch, G. Riedl & U. Möller.** 1994. Bauphysikalische Schädigungswirkungen an Außenputzen und Verblendmauerwerk durch Mikroorganismenbefall und Überprüfung von Schutzmittelansätzen. *Kurzberichte aus der Bauforschung* **35**, 79-85.
- Parker A.R. & C.R. Lawrence.** 2001. Water capture by a desert beetle. *Nature* **414**, 33-34.
- Parkin I.P. & R.G. Palgrave.** 2004. Self-cleaning coatings. *Journal of materials chemistry* **15**, 1689-1695.

- Pascholati S.F., H. Yoshioka, H. Kunoh & R.L. Nicholson.** 1992. Preparation of the infection court by *Erysiphe graminis* f. sp. *hordei*: cutinase is a component of the conidial exudate. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **41**, 53-59.
- Patankar N.A.** 2003. On the modeling of hydrophobic contact angles on rough surfaces. *Langmuir* **19**, 1249-1253.
- Patankar N.A.** 2004a. Transition between superhydrophobic states on rough surfaces. *Langmuir* **20**, 7097-7102.
- Patankar N.A.** 2004b. Mimicking the lotus effect: Influence of double roughness structures and slender pillars. *Langmuir* **20**, 8209-8213.
- Patankar N.A. & Y. Chen.** 2002. Numerical Simulation of Droplet Shapes on Rough Surfaces. *NanoTech 2002 - MSM 2002; Fifth International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems*. San Juan, Puerto Rico, U.S.A.: Applied Computational Research Society, 4.
- Paterson A. & M. Fermigier.** 1997. Wetting of heterogenous surfaces: influence of defect interactions. *Physics of fluids* **9**, 2210-2216.
- Pätzold H.** 1988. Wärmedämm-Verbundsysteme. Fallbeispiele. *Die Mappe* **108**, 26-32.
- Paulus W., ed.** 2005. *Directory of microbicides for the protection of materials*. Dordrecht: Springer, 787.
- Perrichet A.** 1987. Biodeterioration Study of Facade Materials with Hydraulic Binders. In: Society B., ed. *The Biodeterioration of constructional materials*, Vol. 3. Kew, 55-59.
- Pfündel E.E., G. Agati & Z.G. Cerovic.** 2006. Optical properties of plant surfaces. In: Riederer M., Müller K., eds. *Biology of the plant cuticle*, Vol. 23. Oxford: Blackwell Publishing, 216-249.
- Pierce S., K. Maxwell, H. Griffiths & K. Winter.** 2001. Hydrophobic trichome layers and epicuticular wax powders in *Bromeliaceae*. *American Journal of Botany* **88**, 1371-1389.
- Pike N., D. Richard, W. Foster & L. Mahadevan.** 2002. How aphids lose their marbles. *Proceedings of the Royal Society of London B* **269**, 1211-1215.
- Pitois O. & X. Chateau.** 2002. Small particle at a fluid interface: effect of contact angle hysteresis on force and work of detachment. *Langmuir* **18**, 9751-9756.
- Pociute M., B. Lehmann & A. Vitkauskas.** 2003. Wetting behaviour of surgical polyester woven fabrics. *Materials Science* **9**, 410-413.
- Porcheron F. & P.A. Monson.** 2006. Mean-field theory of liquid droplets on roughened solid surfaces: Application to superhydrophobicity. *Langmuir* **22**, 1595-1601.
- Pozzato A., S. Dal Zilio, G. Fois, D. Vendramin, G. Mistura, M. Belotti, Y. Chen & M. Natali.** 2006. Superhydrophobic surfaces fabricated by nanoimprint lithography. *Microelectronic Engineering* **83**, 884-888.
- Pugh G.J.F. & N.G. Buckley.** 1971. The leaf surface as a substrate for colonization by fungi. In: Preece T.F., Dickinson C.H., eds. *Ecology of Leaf Surface Micro-organisms. Proceedings of an International Symposium held at the University of Newcastle, September 1970*, 431-445.
- Qian B. & Z. Shen.** 2005. Fabrication of superhydrophobic surfaces by dislocation-selective chemical etching on Aluminium, Copper, and Zinc substrates. *Langmuir* **21**.
- Quéré D.** 2002a. Fakir droplets. *Nature Materials* **1**, 14-15.
- Quéré D.** 2002b. Rough ideas on wetting. *Physica A* **313**, 32-46.
- Quéré D.** 2004. Model droplets. *Nature Materials* **3**, 79-80.
- Quéré D.** 2005. Non-sticking drops. *Reports on Progress in Physics* **68**, 2495-2532.
- Quéré D. & P. Aussillous.** 2002. Non-stick droplets. *Chemical engineering & technology* **25**, 925-928.
- Quéré D., A. Lafuma & J. Bico.** 2003. Slippery and sticky microtextured solids. *Nanotechnology* **14**, 1109-1112.

- Raddatz H.** 1989. Die Wirkung von Umwelteinflüssen auf technische Erzeugnisse. In: Bagda E., ed. *Umwelteinflüsse auf Oberflächen. Belastungs- und Abbaumechanismen in Abhängigkeit von Umwelt- und Klimaeinflüssen*, Vol. 282. Ehningen: Expert-Verlag, 19-36.
- Rao A.V., M.M. Kulkarni, D.P. Amalnerkar & T. Seth.** 2003. Superhydrophobic silica aerogels based on methyltrimethoxysilane precursor. *Journal of Non-Crystalline Solids* **330**, 187-195.
- Rao A.V., G.M. Pajonk, S.D. Bhagat & P. Barboux.** 2004. Comparative studies on the surface chemical modification of silica aerogels based on various organosilane compounds of the type R_nSiX_{4-n} . *Journal of Non-Crystalline Solids* **350**, 216-223.
- Raschle P.** 1998. Voraussetzungen für Bewuchs auf Putzen und Anstrichen. *FATIPEC Congress* **24**, C103-C114.
- Raschle P.** 2000. Biofilme und sichtbarer Bewuchs bei Bauwerken. *Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft* **89**, 267-278.
- Read N.D., L.J. Kellock, T.J. Collins & A.M. Gundlach.** 1997. Role of topography sensing for infection-structure differentiation in cereal rust fungi. *Planta* **202**, 163-170.
- Reihs K., D. Duff, B. Köhler, D. Rühle & J. Gonzales-Blanco.** 2000. Ultraphobe Lacke. Germany: DE 10008152 A1, 1-5.
- Ren S., Y. Shengrong, Y.-P. Zhao, X. Xiao & T. Yu.** 2002. Morphology Correlation to the Superhydrophobicity in an Organic Thin Film on Rough Al. *International Journal of nonlinear sciences and numerical simulation* **3**, 785-788.
- Renardy Y., S. Popinet, L. Duchemin, M. Renardy, S. Zaleski, C. Josserand, M.A. Drumright-Clarke, D. Richard, C. Clanet & D. Quéré.** 2003. Pyramidal and toroidal water drops after impact on a solid surface. *Journal of Fluid Mechanics* **484**, 69-83.
- Renger G. & U. Schreiber.** 1986. Practical applications of fluorometric methods to algae and higher plant research. In: Govindjee A.J., Fork D.J., eds. *Light Emission by Plant and Bacteria*. New York: Academic, 587-619.
- Rentschler I.** 1971. Die Wasserbenetzbarkeit von Blattoberflächen und ihre submikroskopische Struktur. *Planta* **96**, 119-135.
- Rexroth Mecman GmbH.** 2002. Druckmittelzylinder mit einer zusätzlichen Beschichtung. Germany: DE 20204909 U1.
- Richard D. & D. Quéré.** 1999. Viscous drops rolling on a tilted non-wettable solid. *Europhysics Letters* **48**, 286-291.
- Richard D. & D. Quéré.** 2000. Bouncing water drops. *Europhysics Letters* **50**, 769-775.
- Richard D., C. Clanet & D. Quéré.** 2002. Contact time of a bouncing droplet. *Nature* **417**, 811.
- Riederer M. & L. Schreiber.** 1995. Waxes: The Transport Barriers of Plant Cuticles. In: Hamilton R.J., ed. *Waxes: Chemistry, Molecular Biology and Functions*. Würzburg, 131-156.
- Riederer M. & L. Schreiber.** 2001. Protecting against water loss: analysis of the barrier properties of plant cuticles. *Journal of Experimental Biology* **52**, 2023-2032.
- Riedewald F.** 2006. Bacterial adhesion to surfaces: The influence of surface roughness. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology* **60**, 164-171.
- Rijke A.M.** 1970. Wettability and phylogenetic development of feather structure in water birds. *The Journal of Experimental Biology* **52**, 469-479.
- Rioboo R., C. Tropea & M. Marengo.** 2001. Outcomes from drop impact on solid surfaces. *Atomization and Sprays* **11**, 155-165.
- Rogers D., J. Aprea & T. Bittner.** 2005. Experimental Design Concept for a Microgravity Whole Body Cleansing System. ESA Student Flight Campaign Experiment, International Space University, Strasbourg, 43.
- Rogers J.A.** 2004. Nanostructures, Micro/Nanofabrication, and Micro/Nanodivices. In: Bhushan B., ed. *Springer Handbook of Nanotechnology*. Berlin Heidelberg: Springer, 185-202.

- Roig A., E. Molins, E. Rodriguez, S. Martinez, M. Moreno-Manas & A. Vallribera.** 2004. Superhydrophobic silica aerogels by fluorination at the gel stage. *Chemical Communications* **20**, 2316-2317.
- Rosario R., D. Gust, A.A. Garcia, M. Hayes, J.L. Taraci, T. Clement, J.W. Dailey & S.T. Picraux.** 2004. Lotus effect amplifies light-induced contact angle switching. *The journal of physical chemistry B* **108**, 12640-12642.
- Ross R.T., J.B. Sladen & L.A. Wienert.** 1968. Biodeterioration of paint films. In: Walters A.H., Elphick J.J., eds. *Biodeterioration of materials. Microbiological and allied aspects. Proceedings of the 1st international biodeterioration symposium Southampton 9th-14th september, 1968.* Amsterdam, London, New York: Elsevier, 317-325.
- Rosbach V., P. Patanathabutr & J. Wichitwechkarn.** 2003. Copying and manipulating nature: innovation for textile materials. *Fibers and Polymers* **4**, 8-14.
- Round F.E.** 1981. *The ecology of algae.* Cambridge: University Press, 653.
- Roura P. & J. Fort.** 2002. Comment on "Effects of the Surface Roughness on Sliding Angles of Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces". *Langmuir* **18**, 566-569.
- Rovner J.S.** 1986. Spider hairiness: air stores and low activity enhance flooding survival in inland terrestrial species. *Actas X Congreso Internacional de Aracnologia*, 123-129.
- Rumpf H.** 1974. Die Wissenschaft des Agglomerierens. *Chemie-Ingenieur-Technik* **46**, 1-11.
- Rusam H.** 1989. Befall von Fassadenflächen mit Mikroorganismen. In: Bagda E., ed. *Umwelteinflüsse auf Oberflächen. Belastungs- und Abbaumechanismen in Abhängigkeit von Umwelt- und Klimaeinflüssen*, Vol. 282. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verlag, 51-63.
- Rutschke E.** 1960. Untersuchungen über Wasserfestigkeit und Struktur des Gefieders von Schwimmvögeln. *Zoologische Jahrbücher, Abteilung für Systematik* **87**, 441-506.
- Saenz G. & J.W. Taylor.** 1999. Phylogeny of the Erysiphales (powdery mildews) inferred from internal transcribed spacer ribosomal DNA sequences. *Canadian Journal of Botany* **77**, 150-168.
- Saito H., K. Takai & G. Yamauchi.** 1997. Water- and ice-repellent coatings. *Surface Coatings International* **80**, 168-171.
- Saito T.** 1996. Article Having Water-Repellent Fluororesin Surface And Process For Producing The Same. EP 0696623 A1, 24.
- Sakai M., J.-H. Song, N. Yoshida, S. Suzuki, Y. Kameshima & A. Nakajima.** 2006. Direct observation of internal fluidity in a water droplet during sliding on hydrophobic surfaces. *Langmuir* **22**, 4906-4909.
- Salamon T., W. Lee, T. Krupenkin, M. Hodes, P. Kolodner, R. Enright & A. Salinger.** 2005. Numerical simulation of fluid flow in microchannels with superhydrophobic walls. *International Mechanical Engineering Conference and Exposition.* Orlando, Florida.
- Sanchez C., H. Arribart & M.M. Giraud Guille.** 2005. Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. *Nature Materials* **4**, 277-288.
- Sand W.** 1994. Mikrobielle Schädigungsmechanismen. *Werkstoffe und Korrosion* **45**, 10-16.
- Sand W.** 1995. Mineralische Werkstoffe. In: Brill H., ed. *Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz.* Jena Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 78-110.
- Sand W.** 1996. Microbial mechanisms. In: Heitz E., Flemming H.-C., Sand W., eds. *Microbially influenced corrosion of materials: scientific and engineering aspects.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 15-25.
- Sand W. & E. Bock.** 1990. Mikrobielle Zerstörung keramischer Werkstoffe. *Werkstoffe und Korrosion* **41**, 64-68.
- Sand W. & E. Bock.** 1991. Biodeterioration of Ceramic Materials by Biogenic Acids. *International Biodeterioration* **27**, 175-183.
- Sand W., B. Ahlers, T. Krause-Kupsch, M. Meincke, E. Krieg, M. Diercks, F. Sameluck & E. Bock.** 1989. Mikroorganismen und ihre Bedeutung für die Zerstörung von mineralischen Werkstoffen. *Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* **1**, 36-40.

- Sasaki M., N. Kieda, K. Katayama, K. Takeda & A. Nakajima.** 2004. Processing and properties of transparent super-hydrophobic polymer film with low surface electric resistance. *Journal of Materials Science* **39**, 3717-3722.
- Saunders G.W. & M.H. Hommersand.** 2004. Assessing red algal supraordinal diversity and taxonomy in the context of contemporary systematic data. *American Journal of Botany* **91**, 1494-1507.
- Schäfer W.** 1994. Molecular mechanisms of fungal pathogenicity to plants. *Annual Review of Phytopathology* **32**, 461-477.
- Schleich B. & R.-P. Peters.** 2002. Strukturierte Oberflächen mit hydrophoben Eigenschaften. Germany: EP 0 933 388 B1, 8.
- Schlichting H.E.** 1961. Viable species of algae and protozoa in the atmosphere. *Lloydia* **24**, 81-88.
- Schlichting H.E.** 1964. Meteorological conditions affecting the dispersal of airborne algae and protozoa. *American Journal of Botany* **51**, 684-684.
- Schmid G., S. Jung, K. Gruber & C. Lauterbach.** 2003. Selbstreinigende Oberflächen für bildgebende Sensoren. Germany, 1-6.
- Schmidt-Sonnenschein B.** 2005. The european biocidal products directive. In: Paulus W., ed. *Directory of microbicides for the protection of materials*. Dordrecht: Springer, 65-78.
- Schnathorst W.C.** 1965. Environmental relationships in the powdery mildews. *Annual Review of Phytopathology* **3**, 343-366.
- Schondelmaier D., S. Cramm, R. Klingeler, J. Morenzin, C. Zilkens & W. Eberhardt.** 2002. Orientation and self-assembly of hydrophobic fluoroalkylsilanes. *Langmuir* **18**, 6242-6245.
- Schönherr J.** 1982. Resistance of plant surfaces to water loss: transport properties of cutin, suberin and associated lipids. In: Lange O.L., Nobel P.S., Osmond C.B., Ziegler H., eds. *Physiological Plant Ecology*. Berlin: Springer, 153-179.
- Schreiber L.** 2006. Characterisation of polar paths of transport in plant cuticles. In: Riederer M., Müller C., eds. *Biology of the Plant Cuticle*, Vol. 23. Oxford: Blackwell Publishing, 280-291.
- Schreiber U., T. Endo, H. Mi & K. Asada.** 1995. Quenching Analysis of Chlorophyll Fluorescence by the Saturation Pulse Method: Particular Aspects Relating to the Study of Eukaryotic Algae and Cyanobacteria. *Plant Cell Physiology* **36**, 873-882.
- Schubert H.** 1969. Adhesion forces at freely movable liquid surfaces. In: Polke R., Hohn P., eds. *Physics of adhesion*. Karlsruhe, 117-119.
- Schubert H.** 1979. Grundlagen des Agglomerierens. *Chemie-Ingenieur-Technik* **51**, 266-277.
- Schumann R., S. Eixler & U. Karsten.** 2004. Fassadenbesiedelnde Mikroalgen. *Bauphysikkalender* **D4**, 565-584.
- Schumann R., C. Messal, U. Karsten & H. Venzmer.** 2002. Die Spuren der Sporen: Mikroalgen auf Häuserfassaden - Bauphysikalische und biologische Betrachtungen. *Bautenschutz + Bausanierung* **5**, 27-31.
- Schumann R., N. Häubner, S. Klausch & U. Karsten.** 2005. Chlorophyll extraction methods for the quantification of green microalgae colonizing building facades. *International Biodeterioration & Biodegradation* **55**, 213-222.
- Schwab M., G. Noga & W. Barthlott.** 1995. Bedeutung der Epicuticularwachse für die Pathogenabwehr am Beispiel von *Botrytis cinerea*-Infektionen bei Kohlrabi und Erbse. *Gartenbauwissenschaft* **60**, 102-109.
- Schwates H.O.** 1996. *Biologie der Pilze: Einführung in die angewandte Mykologie*. Stuttgart: UTB, 478.
- Schweisfurth R. & E. Heitz.** 1992. *A working party report on microbiological degradation of materials - and methods of protection*. London: The Institute of Materials, 88.
- Schwinn F.J. & H. Dahmen.** 1973. Beobachtungen zum Infektionsvorgang bei *Erysiphe graminis* DC. *Phytopath. Z.* **77**, 89-92.

- Scott J.L.** 1994. Real Time Weathering as a Test for Evaluating Materials. *Journal of Vinyl Technology* **16**, 116-123.
- Sedlbauer K., M. Krus, W. Hofbauer, K. Breuer & C. Fitz.** 2006. Algenbildung an Fassaden - Eine Übersicht über Forschung und Entwicklung. In: Venzmer H., ed. *Algen auf Fassaden*, 6. *Dahlberg-Kolloquium*, Vol. 11. Wismar: Huss-Medien GmbH, 7-21.
- Sellner M.** 2006. Biofilme auf Fassaden - Diagnostikverfahren in einer Übersicht. In: Venzmer H., ed. *Fassadenbiofilme*, Vol. 11. Berlin: Huss-Medien GmbH, 129-141.
- Shang H.M., Y. Wang, S.J. Limmer, T.P. Chou, K. Takahashi & G.Z. Cao.** 2005a. Optically transparent superhydrophobic silica-based films. *Thin Solid Films* **472**, 37-43.
- Shang H.M., Y. Wang, K. Takahashi, G.Z. Cao, D. Li & Y.N. Xia.** 2005b. Nanostructured superhydrophobic surfaces. *Journal of Materials Science* **40**, 3587-3591.
- Sharma N.K., A.K. Rai & S. Singh.** 2006. Meteorological factors affecting the diversity of airborne algae in an urban atmosphere. *Ecography* **29**, 766-772.
- Shastry A., M.J. Case & K.F. Böhringer.** 2005. Engineering surface roughness to manipulate droplets in microfluidic systems. *MEMS 2005. 18th IEEE International Conference on*, 694-697.
- Shastry A., M.J. Case & K.F. Böhringer.** 2006. Directing droplets using microstructured surfaces. *Langmuir* **22**, 6161-6167.
- Shepherd T. & D.W. Griffiths.** 2006. The effects of stress on plant cuticular waxes. *New Phytologist* **171**, 469-499.
- Shi F., Y. Song, J. Niu, X. Xia, Z. Wang & X. Zhang.** 2006. Facile method to fabricate a large-scale superhydrophobic surface by galvanic cell reaction. *Chemistry of Materials* **18**, 1365-1368.
- Shi F., J. Niu, Z. Liu, Z. Wang, M. Smet, W. Dehaen, Y. Qui & X. Zhang.** 2007. To adjust wetting properties of organic surface by in situ photoreaction of aromatic azide. *Langmuir* **23**, 1253-1257.
- Shibuichi S., T. Onda, N. Satoh & K. Tsujii.** 1996a. Super Water-Repellent Surfaces Resulting from Fractal Structure. *Journal of Physical Chemistry* **100**, 19512-19517.
- Shibuichi S., T. Yamamoto, T. Onda & K. Tsujii.** 1998. Super water- and oil-repellent surfaces resulting from fractal structure. *Journal of Colloid and Interface Science* **208**, 287-294.
- Shirakawa M.A., V.M. John, C.C. Gaylarde, P. Gaylarde & W. Gambale.** 2004. Mould and phototroph growth on masonry facades after repainting. *Materials and Structures* **37**, 472-479.
- Shirtcliffe N.J., G. McHale, M.I. Newton & C.C. Perry.** 2005a. Wetting and wetting transitions on copper-based super-hydrophobic surfaces. *Langmuir* **21**, 937-943.
- Shirtcliffe N.J., G. McHale, M.I. Newton, G. Chabrol & C.C. Perry.** 2004a. Dual-Scale Roughness Produces Unusually Water-Repellent Surfaces. *Advanced Materials* **16**, 1929-1932.
- Shirtcliffe N.J., G. McHale, M.I. Newton, C.C. Perry & P. Roach.** 2005b. Porous materials show superhydrophobic to superhydrophilic switching. *ChemComm* **25**, 3135-3137.
- Shirtcliffe N.J., S. Aqil, C. Evans, G. McHale, M.I. Newton, C.C. Perry & P. Roach.** 2004b. The use of high aspect ratio photoresist (SU-8) for super-hydrophobic pattern prototyping. *Journal of micromechanics and microengineering* **14**, 1384-1389.
- Shiu J.-Y., C.-W. Kuo, P. Chen & C.-Y. Mou.** 2004. Fabrication of tunable superhydrophobic surfaces by nanosphere lithography. *Chemistry of Materials* **16**, 561-564.
- Sidler C.** 2000. Algenproblematik an Fassaden. Die Empa untersuchte die Gründe für den unerwünschten Befall. *Haus Tech* **13**, 46-47.
- Siebert J.** 1994. Mikrobielle Werkstoffzerstörung-Schadensfälle und Gegenmaßnahmen für Kunst- und Naturstoffe: Beschichtungssysteme. *Werkstoffe und Korrosion* **45**, 172-177.
- Singh A., L. Steely & H.R. Allcock.** 2005. Poly[bis(2,2,2-trifluoroethoxy)phosphazene] superhydrophobic nanofibers. *Langmuir* **21**, 11604-11607.

- Singh N.I.** 1981. Seasonal periodicity of algal forms in the air of Shillong. *Cryptogamie, Algologie* **11**, 105-108.
- Sitte P., E.W. Weiler, J.W. Kadereit, A. Bresinsky & C. Körner.** 2002. *Strasburger Lehrbuch der Botanik*. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 1120.
- Sivapalan A.** 1993. Effects of impacting rain drops on the growth and development of powdery mildew fungi. *Plant Pathology* **42**, 256-263.
- Smith W.K. & T.M. McClean.** 1989. Adaptive relationship between leaf water repellency, stomatal distribution, and gas exchange. *American Journal of Botany* **76**, 465-469.
- Song W., F. Xia, Y. Bai, F. Liu, T. Sun & L. Jiang.** 2007. Controllable water permeation on a poly (N-isopropylacrylamide)-modified nanostructured copper mesh film. *Langmuir* **23**, 327-331.
- Souza A.d. & C.C. Gaylarde.** 2002. Biodeterioration of varnished wood with and without biocide: implications for standard test methods. *International Biodeterioration & Biodegradation* **49**, 21-25.
- Spillmann J.J.** 1984. Spray impaction, retention and adhesion: An introduction to basic characteristics. *Pesticide Science* **15**, 97-106.
- Stakman E.C. & J.G. Harrar.** 1957a. The production and liberation of Inoculum. *Principles of Plant Pathology*. New York: Ronald Press, 178-206.
- Stakman E.C. & J.G. Harrar.** 1957b. The dissemination of plant pathogens. *Principles of Plant Pathology*. New York: Ronald Press, 207-257.
- Staub I., H. Dahmen & F.J. Schwinn.** 1974. Light and scanning electron microscopy of cucumber and barley powdery mildew on host and non host plants. *Phytopathology* **64**, 364-372.
- Stein J.** 1973. *Handbook of Phycological Methods. Culture methods and growth measurement*. Cambridge: Cambridge University Press, 448.
- Steinmetz M.** 2000. Solare terrestrische UV-Strahlung in Deutschland. Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz
Umwelt-Bundesamt, 38.
- Stosch A.K., A. Solga, U. Steiner, E.-C. Oerke, W. Barthlott & Z. Cerman.** 2007. Efficiency of self-cleaning properties in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Applied Botany and Food Quality* **81**, (in print).
- Stott M.A.** 1971. Studies on the physiology of some leaf saprophytes. In: Preece T.F., Dickinson C.H., eds. *Ecology of leaf surface microorganisms*. London: Academic Press, 203-210.
- Stratton G.E., R.B. Suter & P.R. Miller.** 2004. Evolution of water surface locomotion by spiders: a comparative approach. *Biological Journal of the Linnean Society* **81**, 63-78.
- Sun M., C. Luo, L. Xu, H. Ji, Q. Ouyang, D. Yu & Y. Chen.** 2005a. Artificial lotus leaf by nanocasting. *Langmuir* **21**, 8978-8981.
- Sun T., L. Feng, X. Gao & L. Jiang.** 2005b. Bioinspired surfaces with special wettability. *Accounts of Chemical Research* **38**.
- Sun T., G. Wang, H. Liu, L. Feng, L. Jiang & D. Zhu.** 2003. Control over the wettability of an aligned carbon nanotube film. *Journal of American Chemical Society* **125**, 14996-14997.
- Sun T., G. Wang, L. Feng, B. Liu, Y. Ma, L. Jiang & D. Zhu.** 2004. Reversible switching between superhydrophilicity and superhydrophobicity. *Angewandte Chemie, International Edition* **43**, 357-360.
- Suter R.B.** 1999. Cheap transport for fishing spiders (Arenae, Pisauridae): the physics of sailing on the water surface. *The Journal of Arachnology* **27**, 489-496.
- Suter R.B. & J. Gruenwlad.** 2000. Spider size and locomotion on the water surface (Araneae, Pisauridae). *The Journal of Arachnology* **28**, 300-308.
- Suter R.B., G.E. Stratton & P.R. Miller.** 2004. Taxonomic variation among spiders in the ability to repel water: surface adhesion and hair density. *The Journal of Arachnology* **32**, 11-21.

- Sutherland I.W.** 2001. Biofilm exopolysaccharides: a strong and sticky framework. *Microbiology*, **147**, 3-9.
- Suzuki S., Y. Komiya, T. Mitsui, S. Tsuyumu, H. Kunoh, T.L.W. Carver & R.L. Nicholson.** 1998. Release of cell wall degrading enzymes from conidia of *Blumeria graminis* on artificial substrata. *Annals of the Phytopathological Society of Japan* **64**, 160-167.
- Swain P.S. & R. Lipowsky.** 1998. Contact Angles on Heterogeneous Surfaces: A New Look at Cassie's and Wenzel's Laws. *Langmuir* **14**, 6772-6780.
- Tadanaga K., N. Katata & T. Minami.** 1997. Super-water-repellent Al₂O₃ coating films with high transparency. *Journal of the American Ceramic Society* **80**, 1040-1042.
- Tadanaga K., J. Morinaga & T. Minami.** 2000a. Formation of Superhydrophobic-Superhydrophilic Pattern on Flowerlike Alumina Thin Film by the Sol-Gel Method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* **19**, 211-214.
- Tadanaga K., J. Morinaga, A. Matsuda & T. Minami.** 2000b. Superhydrophobic-Superhydrophilic Micropatterning on Flowerlike Alumina Coating Film by the Sol-Gel Method. *Chemistry of Materials* **12**, 590-592.
- Takata Y., S. Hidaka & M. Kohno.** 2005. Boiling from a super-water-repellent surface. In: Shah R.K., Ishizuka, M., Rudy, T.M., Wadekar, V.V., ed. *Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology*, Vol. 5. Hoboken, NJ, USA: Engineering Conferences International, 304.
- Tatnall R.E.** 1986. Experimental methods in biocorrosion. In: Dexter S.C., ed. *Biologically induced corrosion*, Vol. 8. Houston, Texas: National Association of Corrosion Engineers, 246-253.
- Tavana H., A. Amirfazli & A.W. Neumann.** 2006. Fabrication of superhydrophobic surfaces of n-Hexatriacontane. *Langmuir* **22**, 5556-5559.
- Teare D.O.H., C.G. Spanos, P. Ridley, E.J. Kinmond, V. Roucoules & J.P.S. Badyal.** 2002. Pulsed Plasma Deposition of Super-Hydrophobic Nanospheres. *Chemistry of Materials* **14**, 4566-4571.
- Teijin Ltd.** 1983. Water-repelling wovens having Lotus-leaf structure. *The international textile magazine* **347**, 26.
- Teshima K., H. Sugimura, Y. Inoue, O. Takai & A. Takano.** 2003. Ultra-water-repellent Poly(ethylene terephthalate) Substrates. *Langmuir* **19**, 10624-10627.
- Thieme M., R. Frenzel, V. Hein & H. Worch.** 2003. Metal surfaces with ultrahydrophobic properties: perspectives for corrosion protection and self-cleaning. *The journal of corrosion science and engineering* **6**.
- Thieme M., R. Frenzel, S. Schmidt, H. Worch, F. Simon & K. Lunkwitz.** 2000. Ultra-hydrophobic properties of metal surfaces: a way to self-cleaning aluminium facade elements. *Proceedings Materials Week 2000*. München, 25-28.
- Thieme M., R. Frenzel, S. Schmidt, F. Simon, A. Hennig, H. Worch, K. Lunkwitz & D. Scharnweber.** 2001. Generation of ultrahydrophobic properties of Aluminium - a first step to self-cleaning transparently coated metal surfaces. *Advanced Engineering Materials* **3**, 691-695.
- Thorpe W.H. & D.J. Crisp.** 1947a. Studies on plastron respiration III. The orientation responses of Aphelocheirus (Hemiptera, Aphelopocheiridae (Naucoridae)) in relation to plastron respiration; together with an account of specialized pressure receptors in aquatic insects. *Journal of Experimental Biology* **24**, 310-328.
- Thorpe W.H. & D.J. Crisp.** 1947b. Studies on plastron respiration. I. The biology of Aphelocheirus (Hemiptera, Aphelocheiridae) (Naucoridae), and the mechanism of plastron retention. *Journal of Experimental Biology* **24**, 227-269.
- Thorpe W.H. & D.J. Crisp.** 1947c. Studies on plastron respiration. II. The respiratory efficiency of the plastron in Aphelocheirus. *Journal of Experimental Biology* **24**, 270-303.

- Thorpe W.H. & D.J. Crisp.** 1949. Studies on plastron respiration IV. Plastron respiration in the Coleoptera. *Journal of Experimental Biology* **26**, 219-260.
- Tiano P.** 1998. Biodeterioration of monumental rocks: decay mechanisms and control methods. *Science and Technology for Cultural Heritage* **7**, 19-.
- Tipler P.A.** 1994. *Physik*. Heidelberg Berlin New York: Spektrum Akademischer Verlag, 1522.
- Tokunaga J., M. Kumada, Y. Sugiyama, N. Watanabe, Y.-B. Chong & N. Matsubara.** 1993. Method of forming air film on submerged surface of submerged part-carrying structure, and film structure on submerged surface. WO 0 616 940 A1, 1-14.
- Tokunaga J., M. Kumada, Y. Sugiyama, N. Watanabe, Y.B. Chong & T. Matsubara.** 1994. Method of forming air layer over immersed of structure having immersed portions, and structure of coat layer formed over immersed surfaces. Japan: US 5,476,056.
- Torkkeli A.** 2003. Droplet microfluidics on a planar surface. Dissertation, Helsinki University of Technology, Espoo; Finland, 214.
- Torkkeli A., A. Häärä, J. Saarilathi, H. Härmä, T. Soukka & P. Tolonen.** 2000. Electrostatic droplet transportation on superhydrophobic surfaces. *Research Activities in Microelectronics 2000*: VTT Electronics, 54-55.
- Troughton J.H. & D.M. Hall.** 1967. Extracuticular wax and contact angle measurements on wheat (*Triticum vulgare* L.). *Australian journal of biological sciences* **20**, 509-525.
- Tserepi A., E. Gogolides, K. Tsougeni, V. Constantoudis & E.S. Valamontes.** 2005. Tailoring the surface topography and wetting properties of oxygen-plasma treated polydimethylsiloxane. *Journal of Applied Physics* **98**, 6.
- Tsoi S., E. Fok, J.C. Sit & G.C. Veinot.** 2004. Superhydrophobic, high surface area, 3D SiO₂ nanostructures through silicone-based surface functionalization. *Langmuir* **20**, 10771-10774.
- Tucker S.L. & N.J. Talbot.** 2001. Surface attachment and pre-penetration stage development by plant pathogenic fungi. *Annual Review of Phytopathology* **39**, 385-417.
- Tukey H.B.J.** 1970. The leaching of substances from plants. *Annual Review of Plant Physiology* **21**, 305-324.
- Turunen M. & S. Huttunen.** 1990. A review of the response of epicuticular wax of conifer needles to air pollution. *Journal of Environmental Quality* **19**, 35-45.
- Uchida K., N. Izumi, S. Sukata, Y. Kojima, S. Nakamura & M. Irie.** 2006. Photoinduced reversible formation of microfibrils on a photochromic diarylethene microcrystalline surface. *Angewandte Chemie* **118**, 1-4.
- Unestam T.** 1991. Water repellency, mat formation, and leaf-stimulated growth of some ectomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* **1**, 13-20.
- van den Hoek C., D.G. Mann & H.M. Jahns.** 1995. *Algae - An introduction to phycology*. Cambridge: Cambridge University Press, 637.
- van der Wal P. & U. Steiner.** 2007. Super-hydrophobic surfaces made from Teflon. *Soft Matter* **3**, 426-429.
- van Loosdrecht M.C. & L. Tjihuis, eds.** 1995. *Biofilm structure, growth and dynamics*. Noordwijkerhout: Pergamon, Oxford, 278.
- Veeramasuneni S., J. Drelich, J.D. Miller & G. Yamauchi.** 1997. Hydrophobicity of ion-plated PTFE coatings. *Progress in Organic Coatings* **31**, 265-270.
- Venzmer H., ed.** 2006. *Fassadenbiofilme*. Berlin: Huss-Medien GmbH, 266.
- Venzmer H. & C. Messal.** 2003. Algen im Norden - Pilze im Süden? Verbreitung und Intensität der Algenbesiedlung auf thermisch sanierten Fassaden - Semiquantitative Analysen und Beispiele aus Nordostdeutschland. In: Venzmer H., ed. *Algen an Fassadenbaustoffen II*, Vol. 5/6. Berlin: Huss-Medien GmbH, 11-22.
- Verband der Lackindustrie e.V.** 1998. Richtlinie zur Bestimmung der Beständigkeit von Beschichtungstoffen gegen Algenbefall. Frankfurt am Main: Verband der Lackindustrie e.V., 8.

- Vieser H.** 1987. Wenn die Steine sterben. *Bild der Wissenschaft*, Vol. 12, 42-56.
- Vogel S.** 2004. Contributions to the functional anatomy and biology of *Nelumbo nucifera* (Nelumbonaceae) I. Pathways of air circulation. *Plant Systematics and Evolution* **249**, 9-25.
- Vogelaar L., R.G.H. Lammertink & M. Wessling.** 2006. Superhydrophobic surfaces having two-fold adjustable roughness prepared in a single step. *Langmuir* **22**, 3125-3130.
- von Werder J., C. Wagner & H. Venzmer.** 2006. Monitoring von Algenbesiedlung mit Hilfe der PAM-Fluorimetrie. In: Venzmer H., ed. *Fassadenbiofilme*, Vol. 11. Berlin: Huss-Medien GmbH, 175-190.
- Voronov R.S., D.V. Papavassiliou & L.L. Lee.** 2006. Boundary slip and wetting properties of interfaces: correlation of the contact angle with the slip length. *The Journal of Chemical Physics* **124**, 10.
- Wagner G.J., E. Wang & R.W. Shepherd.** 2004. New Approaches for Studying and Exploiting an Old Protuberance, the Plant Trichome. *Annals of Botany* **93**, 3-11.
- Wagner P., R. Fürstner, W. Barthlott & C. Neinhuis.** 2003. Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces. *Journal of Experimental Botany* **54**, 1295-1303.
- Wagner T. & U. Friesen.** 2001. Berührungslose Meßeinrichtungen für Fahrzeuge. Germany: DE 10164389 A1.
- Wagner T., C. Neinhuis & W. Barthlott.** 1996. Wettability and contaminability of insect wings as a function of their sculptures. *Acta Zoologica* **77**, 213-225.
- Wagterveld R.M., C.W.J. Berendsen, S. Bouaidat & J. Jonsmann.** 2006. Ultralow hysteresis superhydrophobic surfaces by excimer laser modification of SU-8. *Langmuir* **22**, 10904-10908.
- Wang C.-F., Y.-T. Wang, P.-H. Tung, S.-W. Kuo, C.-H. Lin, Y.-C. Sheen & F.-C. Chang.** 2006a. Stable superhydrophobic polybenzoxazine surfaces over a wide pH range. *Langmuir* **22**, 8289-8292.
- Wang M.-F., N. Raghunathan & B. Ziaie.** 2007. A Nonlithographic Top-Down Electrochemical Approach for Creating Hierarchical (Micro-Nano) Superhydrophobic Silicon Surfaces. *Langmuir* **23**, 2300-2303.
- Wang S., L. Feng & L. Jiang.** 2006b. One-step solution-immersion process for the fabrication of stable bionic superhydrophobic surfaces. *Advanced Materials* **18**, 767-770.
- Ward W.E.** 1952. The lotus symbol: its meaning in Buddhist art and philosophy. *The Journal of Aesthetics and Art Criticism* **11**, 135-146.
- Warscheid T.** 1996. Impacts of microbial biofilms in the deterioration of inorganic building materials and their relevance for the conservation practice. *Zeitschrift für Bauinstandsetzen* **2**, 493-503.
- Warscheid T.** 2000. Integrated concepts for the protection of cultural artifacts against biodeterioration. In: Ciferri O., Tiano P., Mastromei G., eds. *Of microbes and art. The role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage*. New York [u.a.]: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 185-201.
- Warscheid T. & W.E. Krumbein.** 1994a. Biodeteriorationsprozesse an anorganischen Werkstoffen und mögliche Gegenmaßnahmen. *Werkstoffe und Korrosion* **45**, 105-113.
- Warscheid T. & W.E. Krumbein.** 1994b. Biodeterioration processes on inorganic materials and means of countermeasures. *Materials and Corrosion* **45**, 105-113.
- Warscheid T. & W.E. Krumbein.** 1996. General aspects and selected cases. In: Heitz E., Flemming H.-C., Sand W., eds. *Microbially influenced corrosion of materials: scientific and engineering aspects*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 273-295.
- Washo B.D.** 1982. Highly non-wettable surface via plasma polymer vapor deposition. *Organic Coatings and Applied Polymer Science Proceedings* **47**, 69-72.
- Watanabe K., Yanuar & H. Udagawa.** 1999. Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall. *Journal of Fluid Mechanics* **381**, 225-238.

- Watanabe K.J.** 2000. Fluid frictions of shark skin and lotus leaf. *Journal of Japanese Society of Tribologists* **45**, 354-359.
- Watanabe T. & I. Yamaguchi.** 1991. Wettability characteristics of crop leaf surfaces. *Journal of pesticide science* **16**, 651-663.
- Watanabe T. & I. Yamaguchi.** 1993. The specific adhesional forces of aqueous droplets on crop leaf surfaces and factors influencing them. *Journal of pesticide science* **18**, 99-107.
- Weissbarth K.-H.** 1999. Verhinderung der Anhaftung von Schmutz, Wasser und Eis sowie anderer polarer und apolarer Bestandteile an aero- und hydrodynamischen Profilen durch Herstellung einer chemisch und strukturell ausgebildeten oder aber lediglich strukturell ausgebildeten Oberfläche. Germany: DE 19903086 A1, 1-2.
- 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. Master Thesis, Linköping University, Stockholm, 46.
- Werner O., L. Wagberg & T. Lindström.** 2005. Wetting of structured hydrophobic surfaces by water droplets. *Langmuir* **21**, 12235-12243.
- Wheeler B.E.J.** 1981. Biology of powdery mildews on leaf surfaces. In: Blakeman J.P., ed. *Microbial ecology of the phylloplane*. London [u.a.]: Academic Press, 69-84.
- Wiedemann P. & C. Neinhuis.** 1998. Biomechanics of isolated plant cuticles. *Botanica Acta* **111**, 28-34.
- Wier K.A. & T.J. McCarthy.** 2006. Condensation on ultrahydrophobic surfaces and its effect on droplet mobility: Ultrahydrophobic surfaces are not always water repellent. *Langmuir* **22**, 2433-2436.
- Wiese M.V.** 1991. *Compendium of wheat diseases*. St. Paul, Minnesota: APS Press, 112.
- Wilson J.** 1984. Microscopic features of wind damage to leaves of *Acer pseudoplatanus* L. *Annals of Botany* **53**, 73-82.
- Wimpenny J.W.T.** 2000. An overview of biofilms as functional communities. In: Allison D.G., Gilbert P., Lappin-Scott H.M., Wilson M., eds. *Community structure and cooperation in biofilms*: Cambridge University Press, 1-24.
- Wingard S.A.** 1941. The nature of disease resistance in plants I. *Botanical Review* **7**, 59-104.
- Wolfram E. & R. Faust.** 1978. Liquid drops on a tilted plate, contact angle hysteresis and the young contact angle. In: Padday J.F., ed. *Wetting, spreading and adhesion*. London: Academic, 213-226.
- Wolter M., W. Barthlott, M. Knoche & G. Noga.** 1988. Concentration effects and regeneration of epicuticular waxes after treatment with Triton X-100 surfactant. *Angewandte Botanik* **62**, 53-62.
- Woodward I., W.C.E. Schofield, V. Roucoules & J.P.S. Badyal.** 2003. Super-hydrophobic surfaces produced by plasma fluorination of polybutadiene films. *Langmuir* **19**, 3432-3438.
- Wortmann G.B.** 1965. Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Blattoberfläche und deren Veränderung durch Pflanzenschutzmittel. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **72**, 614-670.
- Wright A.J., B.J. Thomas & T.L.W. Carver.** 2002a. Early adhesion of *Blumeria graminis* to plant and artificial surfaces demonstrated by centrifugation. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **61**, 217-226.
- Wright A.J., B.J. Thomas, H. Kunoh, R.L. Nicholson & T.L.W. Carver.** 2002b. Influences of substrata and interface geometry on the release of extracellular material by *Blumeria graminis* conidia. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **61**, 163-178.

- Wright A.J., T.L.W. Carver, B.J. Thomas, N.I.D. Fenwick, H. Kunoh & R.L. Nicholson.** 2000. The rapid and accurate determination of germ tube emergence site by *Blumeria graminis* conidia. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **57**, 281-301.
- Wright I.C.** 1986. The deterioration of paint films by algae and lichens. In: Barry S., Houghton D.R., eds. *Biodeterioration 6. Papers presented at the 6th international biodeterioration symposium Washington, DC, Aug., 1984*. Slough: CAB, 637-643.
- Wu X. & G. Shi.** 2005a. Fabrication of a lotus-like micro-nanoscale binary structured surface and wettability modulation from superhydrophilic to superhydrophobic. *Nanotechnology* **16**, 2056-2060.
- Wu X., L. Zheng & D. Wu.** 2005b. Fabrication of Superhydrophobic Surfaces from Microstructured ZnO-Based Surfaces via a Wet-Chemical Route. *Langmuir* **21**, 2665-2667.
- Wu Y., H. Sugimura, Y. Inoue & O. Takai.** 2002. Thin films with nanotextures for transparent and ultra water-repellent coatings produced from Trimethylmethoxysilane by microwave plasma CVD. *Chemical vapor deposition* **8**, 47-50.
- Wulf M., A. Wehling & O. Reis.** 2002. Coatings with self-cleaning properties. *Macromolecular Symposia* **187**, 459-467.
- Wunder T.** 2004. Einsatz von Bioziden. In: Dolt P., ed. *Algen, Pilze, Fassaden*. Geislingen: C. Maurer Druck und Verlag, 101-110.
- Wynn W.K.** 1981. Tropic and taxic responses of pathogens to plants. *Annual Review of Phytopathology* **19**, 237-255.
- Xia F., L. Feng, S. Wang, T. Sun, W. Song, W. Jiang & L. Jiang.** 2006. Dual-responsive surfaces that switch between superhydrophilicity and superhydrophobicity. *Advanced Materials* **18**, 432-436.
- Xiao W., Z. Huang & Z. He.** 2006. Tuning the wettability on La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ coatings from superhydrophilicity to superhydrophobicity by hierarchical microstructure. *Applied Physics Letters* **89**, 3.
- Xie Q., J. Xu, L. Feng, L. Jiang, W. Tang, X. Luo & C.C. Han.** 2004. Facile creation of a super-amphiphobic coating surface with bionic microstructure. *Advanced Materials* **16**, 302-305.
- Xu L., W. Chen, A. Mulchandani & Y. Yan.** 2005a. Reversible Conversion of Conducting Polymer Films from Superhydrophobic to Superhydrophilic. *Angewandte Chemie* **44**, 6009-6012.
- Xu Y., W.H. Fan, Z.H. Li, D. Wu & Y.H. Sun.** 2003. Antireflective silica thin films with super water repellence via a solgel process. *Applied Optics* **42**, 108-112.
- Xu Y., D. Wu, Y.H. Sun, Z.X. Huang, X.D. Jiang, X.F. Wei, Z.H. Li, B.Z. Dong & Z.H. Wu.** 2005b. Superhydrophobic antireflective silica films: fractal surfaces and laser-induced damage thresholds. *Applied Optics* **44**, 527-533.
- Yabu H., Y. Hirai & M. Shimomura.** 2006. Electroless Plating of Honeycomb and Pincushion Polymer Films Prepared by Self-Organization. *Langmuir* **22**, 9760-9764.
- Yabu H., M. Takebayashi, M. Tanaka & S. Masatsugu.** 2005. Superhydrophobic and Lipophobic Properties of Self-Organized Honeycomb and Pincushion Structures. *Langmuir* **21**, 3235-3237.
- Yamanaka M., K. Sada, M. Miyata, K. Hanabusa & K. Nakano.** 2006. Construction of superhydrophobic surfaces by fibrous aggregation of perfluoroalkyl chain-containing organogelators. *Chemical Communications* **21**, 2248-2250.
- Yamauchi G., J.D. Miller, H. Saito, K. Takai, T. Ueda, H. Takazawa, H. Yamamoto & S. Nislihi.** 1996. Wetting characteristics of newly developed water-repellent material. *Colloids and Surfaces A* **116**, 125-134.
- Yan H., K. Kurogi, H. Mayama & K. Tsujii.** 2005. Environmentally stable super water-repellent Poly(alkylpyrrole) films. *Angewandte Chemie* **117**, 3519-3522.
- Yan L., K. Wang & L. Ye.** 2003. Super hydrophobic property of PVDF/CaCO₃ nanocomposite coatings. *Journal of Material Science Letters* **22**, 1713-1717.

- Yan Y., M. Chan-Park & C. Yue.** 2002. Rapid replication of high aspect ratio molds for uv embossing. *Innovation in Manufacturing Systems and Technology*, 9.
- Yanagimachi I., N. Nashida, K. Iwasa & H. Suzuki.** 2005. Enhancement of sensitivity of electrochemical heavy metal detection by evaporative concentration using a super-hydrophobic surface. *Transducers`05*. Seoul, Korea, 1207-1210.
- Yang C., U. Tartaglino & B.N.J. Persson.** 2006. The influence of surface roughness on superhydrophobicity. *Physical Review Letters* **97**, 1-4.
- Yang S.L. & A.H. Ellingboe.** 1972. Cuticle layer as a determining factor for the formation of mature appressoria of *Erysiphe graminis* on wheat and barley. *Phytopathologia* **62**, 708-714.
- Yang Y.H., Z.Y. Li, B. Wang, C.X. Wang, D.H. Chen & G.W. Yang.** 2005. Self-assembled ZnO agave-like nanowires and anomalous superhydrophobicity. *Journal of Physics Condensed Matter* **17**, 5441-5446.
- Yarwood C.E.** 1950. Water content of fungus spores. *American Journal of Botany* **37**, 636-639.
- Yarwood C.E.** 1957. Powdery mildews. *The botanical review* **23**, 235-301.
- Yarwood C.E.** 1978. Water and the infection process. In: Kozłowski T.T., ed. *Water and plant disease*, Vol. 5. New York: Academic Press, 141-173.
- Yeager C.C.** 1968. Laboratory and service tests for PVC. In: Walters A.H., Elphick J.J., eds. *Biodeterioration of materials. Microbiological and allied aspects. Proceedings of the 1st international biodeterioration symposium Southampton 9th-14th september, 1968*. Amsterdam, London, New York: Elsevier, 151-161.
- Yoshimitsu Z., A. Nakajima, T. Watanabe & K. Hashimoto.** 2002. Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets. *Langmuir* **18**, 5818-5822.
- Young M.E. & D.C.M. Urquhart.** 1996. Factors affecting the growth of algae on cleaned sandstone buildings in Scotland. In: Riederer J., ed. *Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone : Berlin, 30. Sept. - 4. Oct. 1996*. Berlin: Möller, 593-599.
- Young T.** 1805. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **95**, 65-87.
- Youngblood J.P. & T.J. McCarthy.** 1999. Ultrahydrophobic polymer surfaces prepared by simultaneous ablation of polypropylene and sputtering of poly(tetrafluoroethylene) using radio frequency plasma. *Macromolecules* **32**, 6800-6806.
- Yu X., Z. Wang & X. Zhang.** 2006. Surface gradient material: From superhydrophobicity to superhydrophilicity. *Langmuir* **22**, 4483-4486.
- Zabkiewicz J.A., D. Coupland & F. Ede.** 1988. Effects of surfactants on droplet spreading and drying rates in relation to foliar uptake. In: Cross B., Scher H.B., eds. *Pesticide formulations, innovations and developments*, Vol. 371. Washington: American Chemical Society Symposium Series, 77-89.
- Zeng L., X. Wu, L. Z. & D. Wu.** 2004. Superhydrophobicity from microstructured surface. *Chinese Science Bulletin* **49**, 1779-1787.
- Zhai L., F.C. Cebeci, R.E. Cohen & M.F. Rubner.** 2004. Stable superhydrophobic coatings from polyelectrolyte multilayers. *Nano Letters* **4**, 1349-1353.
- Zhai L., M.C. Berg, F.C. Cebeci, Y. Kim, J.M. Milwid, M.F. Rubner & R.E. Cohen.** 2006. Patterned superhydrophobic surfaces: toward a synthetic mimic of the Namib Desert beetle. *Nano Letters* **6**, 1213-1217.
- Zhang G., D. Wang, Z.-Z. Gu & H. Möhwald.** 2005a. Fabrication of superhydrophobic surfaces from binary colloidal assembly. *Langmuir* **21**, 9143-9148.
- Zhang J. & D.Y. Kwok.** 2006. Contact line and contact angle dynamics in superhydrophobic channels. *Langmuir* **22**, 4998-5004.
- Zhang J., J. Li & Y. Han.** 2004. Superhydrophobic PTFE surfaces by extension. *Macromolecular Rapid Communications* **25**, 1105-1108.

- Zhang J., W. Huang & Y. Han.** 2005b. Reversible superhydrophobicity to superhydrophilicity transition by extending and unloading an elastic polyamide film. *Macromolecular Rapid Communications* **26**, 477-480.
- Zhang J., W. Huang & H. Yanchun.** 2006a. A composite polymer film with both superhydrophobicity and superoleophilicity. *Macromolecular Rapid Communications* **27**, 804-808.
- Zhang J., W. Huang & Y. Han.** 2006b. Wettability of Zinc oxid surfaces with controllable structures. *Langmuir* **22**, 2946-2950.
- Zhang J., P. France, A. Radomyselskiy, S. Datta, J. Zhao & W. van Ooij.** 2003. Hydrophobic cotton fabric coated by a thin nanoparticulate plasma film. *Journal of Applied Polymer Science* **88**, 1473-1481.
- Zhang L., Z. Zhou, B. Cheng, J.M. DeSimone & E. Samulski.** 2006c. Superhydrophobic behavior of a perfluoropolyether Lotus-leaf like topography. *Langmuir* **22**, 8576-8580.
- Zhang X., M. Jin, Z. Liu, S. Nishimoto, H. Saito, T. Murakami & A. Fujishima.** 2006d. Preparation and photocatalytic wettability conversion of TiO₂-based superhydrophobic surfaces. *Langmuir* **22**, 9477-9479.
- Zhang X., F. Shi, X. Yu, H. Liu, Y. Fu, Z. Wang, L. Jiang & X. Li.** 2004. Polyelectrolyte Multilayer as Matrix for Electrochemical Deposition of Gold Clusters: Toward Super-Hydrophobic Surface. *Journal of American Chemical Society* **126**, 3064-3065.
- Zhao N., L. Weng, X. Zhang, Q. Xie, X. Zhang & J. Xu.** 2006. A Lotus-leaf-like superhydrophobic surface prepared by solvent-induced crystallization. *ChemPhysChem* **7**, 824-827.
- Zheng Q.-S., Y. Yu & Z.-H. Zhao.** 2005. Effects of hydraulic pressure on the stability and transition of wetting modes on superhydrophobic surfaces. *Langmuir* **21**, 12207-12212.
- Zheng Y., X. Gao & L. Jiang.** 2007. Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings. *Soft Matter* **3**, 178-182.
- Zhou F., M. Chen, W. Liu, J. Liu, Z. Liu & Z. Mu.** 2003. Fabrication of positively patterned conducting polymer microstructures via one-step electrodeposition. *Advanced Materials* **15**, 1367-1370.
- Zhu L., Y.Y. Feng, X.Y. Ye & Z.Y. Zhou.** 2005a. Tuning wettability and getting superhydrophobic surface by controlling surface roughness with well-designed microstructures. *Transducers '05*. Seoul, Korea, 1481-1484.
- Zhu L., J. Xiu, P.A. Tamirisa, D.W. Hess & C.-P. Wong.** 2005b. Superhydrophobicity on two-tier rough surfaces fabricated by controlled growth of aligned carbon nanotube arrays coated with fluorocarbon. *Langmuir* **21**, 11208-11212.
- Zhu W., X. Feng, L. Feng & L. Jiang.** 2006a. UV-manipulated wettability between superhydrophobicity and superhydrophilicity on a transparent and conductive SnO₂ nanorod film. *Chem. Comm.* **26**, 2753-2755.
- Zhu Y., J.C. Zhang, J. Zhai, Y.M. Zheng, J.Z. Feng & L. Jiang.** 2006b. Multifunctional Carbon Nanofibres with Conductive, Magnetic and Superhydrophobic Properties. *ChemPhysChem* **7**, 336-341.
- Ziegenspeck H.** 1942. Zur physikalischen Chemie unbenetzbarer besonders bewachster Blätter. *Kolloid-Zeitschrift* **100**, 401-403.
- Zimmermann G.** 2006. Schäden an Dachdeckungen. In: Zimmermann G., Ruhnau R., eds. *Schadenfreies Bauen*, Vol. 40. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, 3-5.
- Zimmermann J., S. Seeger, G. Artus & S. Jung.** 2004. Superhydrophobic coating. WO 2004/113456 A2.
- Zisman W.A.** 1964. Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution. In: Fowkes F.M., ed. *Contact angle, wettability, and adhesion*, Vol. 43. Washington: American Chemical Society, 1-51.

Zorba V., L. Persano, D. Pisignano, A. Athanassiou, E. Stratakis, R. Cingolani, P. Tzanetakis & C. Fotakis. 2006. Making silicon hydrophobic: wettability control by two-lengthscale simultaneous patterning with femtosecond laser irradiation. *Nanotechnology* **17**, 3234.

13. Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Anziehenden Kräfte, die auf Wassermoleküle (blau) in Abhängigkeit ihrer Lage einwirken.	15
Abb. 3.2: Verhalten von Wasser auf unterschiedlich benetzbaren Oberflächen. (verändert nach de Gennes <i>et al.</i> , 2004).	16
Abb. 3.3: Flüssigkeitstropfen auf einer Festkörperoberfläche: Bestimmung des Kontaktwinkels mittels angelegter Tangente am Dreiphasenpunkt Gas/Flüssigkeit/Festkörper. Grenzflächenspannungen: Flüssigkeit/Gas σ_{lg} ; Festkörper/Flüssigkeit σ_{sl} ; Festkörper/Gas σ_{sg} .	17
Abb. 3.4: ZISMAN's Plot zur Ermittlung der kritischen Oberflächenspannung (σ_c) einer Oberfläche mit Hilfe von Flüssigkeiten unterschiedlicher Oberflächenspannungen (verändert nach Zisman, 1964).	18
Abb. 3.5: Ideale Festkörperoberfläche mit einem Sinusprofil. Bei geringen Amplituden folgt die Flüssigkeit den Wellen. a: Amplitude; λ : Wellenlänge; k: Faktor (verändert nach de Gennes <i>et al.</i> , 2004).	20
Abb. 3.6: Ideale Festkörperoberfläche mit Sinusprofil. Eindringtiefe von Wasser bei zwei unterschiedlichen Youngs-KW. (verändert nach de Gennes <i>et al.</i> , 2004).	21
Abb. 3.7: Benetzung einer strukturierten Oberfläche mit Hinterschneidungen (verändert nach Herminghaus, 2000).	21
Abb. 3.8: Benetzung einer hierarchisch aufgebauten, selbstähnlich strukturierten Oberfläche (verändert nach Herminghaus, 2000).	22
Abb. 3.9: Fortschrittswinkel θ_F und Rückschrittwinkel θ_R eines Tropfens auf einer geneigten Oberfläche.	22
Abb. 3.10: Untersuchungen zum Einfluss von Wärmebehandlungen auf den Fortschritt- und Rückschrittwinkel einer wachsstrukturierten Oberfläche (aus (Dettre & Johnson, 1964))	24
Abb. 3.11: Mögliche Kontaktlinien zwischen Wasser und Festkörper auf zwei unterschiedlich strukturierten Oberflächen mit dem gleichen Feststoffanteil. a: Gitter; b: Zylinder (Verändert nach Öner & McCarthy, 2000).	25
Abb. 3.12: Mögliche Benetzungszustände geometrisch strukturierter Oberflächen. (Verändert nach Bico <i>et al.</i> , 2002).	30
Abb. 4.1: a: Weißes Mycel von <i>B. graminis</i> auf Weizen-Blättern. b: REM-Aufnahme eines mit <i>B. graminis</i> befallenen Weizen-Blattes (191x vergrößert).	59
Abb. 4.2: Vergleich einer Weizenoberfläche (Sorte „Ludwig“) mit intakten Wachsen (a) und mit Watte abgewischten Wachsen (b).	65
Abb. 4.3: Schematischer Aufbau der Inokulationskammer und der Lochplatte für Probenteller	67
Abb. 4.4: Schematischer Aufbau der Beregnungsapparatur	68
Abb. 4.5: Befallsermittlung mittels REM. a) Auszählen der Konidien auf Referenztablett. b) Nach Beneblung auf Blattoberfläche (Sorte „Ludwig“) verbliebene Konidien (Pfeile: Einzelne Konidien; Kreis: Agglomerierte Konidien).	69
Abb. 4.6: Versuchsverlaufs zum Einfluss von Niederschlägen auf den Befall von Weizen mit <i>B. graminis</i> .	70
Abb. 4.7: Anzahl verbliebener <i>B. graminis</i> Konidien auf Weizen bei Beneblung 1 h nach Inokulation. Sorten: Ka = Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0 = zerstörte Wachse	72

Abb. 4.8: Anzahl verbliebener <i>B. graminis</i> Konidien auf Weizen bei Beneblung 2 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0= zerstörte Wachse	73
Abb. 4.9: Anzahl verbliebener <i>B. graminis</i> Konidien auf Weizen bei Beneblung 3 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0= zerstörte Wachse	74
Abb. 4.10: Anzahl verbliebener <i>B. graminis</i> Konidien auf Weizen bei Beregnung 1 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0= zerstörte Wachse	74
Abb. 4.11: Anzahl verbliebener <i>B. graminis</i> Konidien auf Weizen bei Beregnung 2 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0= zerstörte Wachse	75
Abb. 4.12: Anzahl verbliebener <i>B. graminis</i> Konidien auf Weizen bei Beregnung 3 h nach Inokulation. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0= zerstörte Wachse	76
Abb. 4.13: Befall der Weizensorte „Kanzler“ mit <i>B. graminis</i> in Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beneblung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	76
Abb. 4.14: Befall der Weizensorte „Kris“ mit <i>B. graminis</i> in Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beneblung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	77
Abb. 4.15: Befall der Weizensorte „Ludwig“ mit <i>B. graminis</i> in Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beneblung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	78
Abb. 4.16: Befall der Weizensorte „Kanzler“ mit <i>B. graminis</i> in Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beregnung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	78
Abb. 4.17: Befall der Weizensorte „Kris“ mit <i>B. graminis</i> in Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beregnung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	79
Abb. 4.18: Befall der Weizensorte „Ludwig“ mit <i>B. graminis</i> in Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beregnung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	80
Abb. 4.19: Keimrate in Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen Inokulation und Beneblung und der Wachststruktur. Sorten: Ka= Kanzler; Kr = Kris; Lu = Ludwig; 1 = intakte Wachse; 0= zerstörte Wachse.	81
Abb. 4.20: Mögliche Infektionswege, wie Pilze pflanzliche Oberflächen penetrieren. Auf superhydrophoben Oberflächen bedarf es eines eigenen Wasservorrats für Keimung und Penetration.	88
Abb. 4.21: Konidie von <i>B. graminis</i> auf der Oberfläche von <i>T. aestivum</i> cv. „Kanzler“ mit abgewischten Wachsen (Trockenpräparat). Deutlich sind sieben kurze „abnormale“ Keimschläuche zu erkennen.	90
Abb. 5.1: REM-Aufnahme von <i>N. nucifera</i> . Charakteristisch ist die große Anzahl von kegel- bis ellipsenförmigen Zellpapillen, die mit epikutikularen Wachskristallen vollständig überzogen sind.	94
Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Arretierung der Lotusblätter. Dr: Drahring; H: Haken; Hs: Holzstab; Kk: Kunststoffkübel; Lb: Lotusblatt; Sa: Seilarretierung.	96

Abb. 5.3: Versuchsvarianten der Untersuchung zum Einfluss von Niederschlägen auf den Pilzbefall von <i>N. nucifera</i> (Kürzel siehe Tab. 5.2).....	97
Abb. 5.4: Bearbeitungsschritte der Lotus-Bilder zur Ermittlung des Pilzbefalls.....	99
Abb. 5.5: Beispielhafte Pilzbelegungsdichten von <i>N. nucifera</i> mit <i>Oidium spec.</i>	101
Abb. 5.6: Makroskopisches Erscheinungsbild des Pilzmycels auf Lotus.....	103
Abb. 5.7: REM-Aufnahme des Pilzes <i>Oidium spec.</i> auf Lotus.	104
Abb. 5.8: Verlauf der rel. Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von 5 Wochen im Frühsommer 2004. Dargestellt ist die rel. Luftfeuchtigkeit im Tagesdurchschnitt auf der Basis von 96 Messwerten.	105
Abb. 5.9: Verlauf der rel. Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von 6 Wochen im Spätsommer 2004. Dargestellt ist die rel. Luftfeuchtigkeit im Tagesdurchschnitt auf der Basis von 96 Messwerten.	106
Abb. 5.10: Verlauf der Temperatur über einen Zeitraum von 5 Wochen im Frühsommer 2004. Dargestellt ist die Temperatur im Tagesdurchschnitt auf der Basis von 96 Messwerten.	107
Abb. 5.11: Verlauf der Temperatur über einen Zeitraum von 6 Wochen im Spätsommer 2004. Dargestellt ist die Temperatur im Tagesdurchschnitt auf der Basis von 96 Messwerten.	108
Abb. 5.12: Verlauf des Befalls von <i>N. nucifera</i> mit <i>Oidium spec.</i> bei vier verschiedenen Behandlungsvarianten. Dargestellt sind die prozentualen Flächenbelegungen mit Pilz im Vergleich über fünf Wochen im Frühsommer 2003.	109
Abb. 5.13: Verlauf des Befalls von <i>N. nucifera</i> mit <i>Oidium spec.</i> bei vier verschiedenen Behandlungsvarianten. Dargestellt sind die prozentualen Flächenbelegungen mit Pilz im Vergleich über sechs Wochen im Spätsommer 2003.	110
Abb. 5.14: Verlauf des Befalls von <i>N. nucifera</i> mit <i>Oidium spec.</i> bei vier verschiedenen Behandlungsvarianten. Dargestellt sind die prozentualen Flächenbelegungen mit Pilz im Vergleich über sechs Wochen im Frühsommer 2004.	111
Abb. 5.15: Verlauf des Befalls von <i>N. nucifera</i> mit <i>Oidium spec.</i> bei vier verschiedenen Behandlungsvarianten. Dargestellt sind die Flächenbelegungen mit Pilz eingeteilt in Klassen im Vergleich über sechs Wochen im Spätsommer 2004.	112
Abb. 5.16: Fotografische Dokumentation des Pilzbefalls von <i>N. nucifera</i> im Spätsommer 2004 (S 4).	114
Abb. 6.1: Schädigungsmechanismen bei Werkstoffen hervorgerufen durch Biofilme; Pfeile: Rissbildung oder Abplatzen durch Salze, Feuchtigkeit und Frost-Tau-Wechsel.....	123
Abb. 6.2: Versuchsablauf zur Simulation der Besiedlung von Baustoffen mit Algen.....	131
Abb. 6.3: Aufbewahrungsbox mit Fassadenprüfkörpern.....	133
Abb. 6.4: Schematischer Aufbau der Beregnungskammer. Schwarze Pfeile deuten den Weg des Wassers bei Beregnung an.....	134
Abb. 6.5: Schematischer Aufbau der Nassinokulation von Prüfkörpern.....	135
Abb. 6.6: Modifikationen am Fluoreszenzmikroskop zur Messung der Fluoreszenzintensität von Algen auf Baustoffoberflächen.....	136
Abb. 6.7: Schematische Darstellung des Aufbaus der Messschablone (links) und die alternierende Messstrecke auf der Schablone während der Fluoreszenzerfassung (rechts).	138

Abb. 6.8: Grafische Darstellung von Fluoreszenzdaten. Links: Probenkörper mit Algenbelegung und projizierten Messpunkten (Kreise mit Kreuzen). Rechts: Flächenplot der ermittelten Chlorophyllfluoreszenzintensität (hell: geringe Fluoreszenz, dunkel grün: stärkere Fluoreszenz).	139
Abb. 6.9: Fluoreszenzänderung [ΔV] vier verschiedener Fassadenfarben sowie der Referenz (P) über 10 Wochen Versuchsdauer. Mittelwerte aus fünf Parallelen mit einfacher Standardabweichung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$). Abkürzungen siehe Tab. 6.2.	141
Abb. 6.10: Fluoreszenzänderung [ΔV] drei verschiedener Dachziegel sowie der Referenz (P) über 10 Wochen Versuchsdauer. Mittelwerte aus fünf Parallelen mit einfacher Standardabweichung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$). Abkürzungen siehe Tab. 6.2.	142
Abb. 6.11: Fluoreszenzänderung [ΔV] vier verschiedener Fassadenfarben sowie der Referenz (P) über 12 Wochen Versuchsdauer. Mittelwerte aus fünf Parallelen mit einfacher Standardabweichung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$). Abkürzungen siehe Tab. 6.2. FT* ist eine leicht modifizierte, jedoch chemisch und strukturell zu Lotusan® identische Fassadenfarbe (persönliche Kommunikation mit STO AG)	143
Abb. 6.12: Fluoreszenzänderung [ΔV] drei verschiedener Dachziegel sowie der Referenz (P) über 12 Wochen Versuchsdauer. Mittelwerte aus fünf Parallelen mit einfacher Standardabweichung. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$). Abkürzungen siehe Tab. 6.2.	144
Abb. 7.1: Möglichkeiten der Temperaturregulierung für Kondensationsversuche am KW-Gerät. (T_{FK} = Temp. Festkörper; T_W = Temp. Wasser; T_L = Temp. Luft)	154
Abb. 7.2: Schematische Darstellung der Vorrichtung zur Veränderung der Oberflächentemperatur am Kontaktwinkelmessgerät	157
Abb. 7.3: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. macrorrhiza</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	163
Abb. 7.4: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. aurantiaca</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	163
Abb. 7.5: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. cannabinum</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	164
Abb. 7.6: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. mexicana</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	165
Abb. 7.7: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>B. oleracea</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	165
Abb. 7.8: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>C. japonicum</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	166

Abb. 7.9: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>C. esculenta</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	167
Abb. 7.10: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>H. halodendron</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)	167
Abb. 7.11: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>N. nucifera</i> . Mittelwerte aus 18 Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	168
Abb. 7.12: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>S. vulgaris</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	169
Abb. 7.13: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>T. flavum</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	169
Abb. 7.14: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>T. majus</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$) (Verändert nach Diplomarbeit von B. Mockenhaupt).....	170
Abb. 7.15: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>X. robustum</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	171
Abb. 7.16: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. macrorrhiza</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen*	171
Abb. 7.17: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. aurantiaca</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	172
Abb. 7.18: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. cannabinum</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	173
Abb. 7.19: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. mexicana</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	173
Abb. 7.20: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>B. oleracea</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	174
Abb. 7.21: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>C. japonicum</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	174

Abb. 7.22: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>C. esculenta</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	175
Abb. 7.23: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>H. halodendron</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	175
Abb. 7.24: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>N. nucifera</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	176
Abb. 7.25: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>S. vulgaris</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	177
Abb. 7.26: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>T. flavum</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	177
Abb. 7.27: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>T. majus</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	178
Abb. 7.28: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>X. robustum</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	179
Abb. 7.29: Negative Differenz der Kontaktwinkel bei Oberflächenkühlung um -15°C , vergleichend dargestellt für 13 Pflanzenarten. Gelbe Säulen: Pflanzen mit Röhrchenwachsen. Grüne Säulen: Pflanzen mit anderen Wachstypen. Rote Karos: doppelstrukturierte Oberflächen, bestehend aus ausgeprägten Zellpapillen kombiniert mit dreidimensionalen epikutikularen Wachskristallen.	179
Abb. 7.30: Differenz der Abrollwinkel bei Oberflächenkühlung um -15°C , vergleichend dargestellt für 13 Pflanzenarten. Gelbe Säulen: Pflanzen mit Röhrchenwachsen. Grüne Säulen: Pflanzen mit anderen Wachstypen. Rote Karos: doppelstrukturierte Oberflächen, bestehend aus ausgeprägten Zellpapillen kombiniert mit dreidimensionalen epikutikularen Wachskristallen.	180
Abb. 7.31: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. macrorrhiza</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	181
Abb. 7.32: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>A. macrorrhiza</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	181
Abb. 7.33: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>B. oleracea</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	182

Abb. 7.34: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>B. oleracea</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	182
Abb. 7.35: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>C. esculenta</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	183
Abb. 7.36: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>C. esculenta</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	183
Abb. 7.37: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>T. majus</i> Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	184
Abb. 7.38: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>T. majus</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	184
Abb. 7.39: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>X. robustum</i> Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	185
Abb. 7.40: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei <i>X. robustum</i> . Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	185
Abb. 7.41: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Circuit Foil. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	186
Abb. 7.42: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Bolta Folie. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	187
Abb. 7.43: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Creavis-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	187
Abb. 7.44: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Mincor-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	188
Abb. 7.45: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Circuit Foil. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	189
Abb. 7.46: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Bolta Folie. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen.	

Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	189
Abb. 7.47: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Creavis-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	190
Abb. 7.48: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Mincor-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$).	191
Abb. 7.49: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Circuit Foil. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	191
Abb. 7.50: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Circuit Foil. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	192
Abb. 7.51: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Bolta Folie. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$) (Verändert nach Diplomarbeit von B. Mockenhaupt).	192
Abb. 7.52: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Bolta Folie. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	193
Abb. 7.53: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Creavis-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	193
Abb. 7.54: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Creavis-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	194
Abb. 7.55: Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Mincor-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	194
Abb. 7.56: Änderung des Abrollwinkels in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur beim Mincor-Spray. Mittelwerte aus zehn Parallelen mit 95%-Konfidenzintervallen. Säulen, die sich den gleichen Buchstaben teilen, sind nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$)*	195
Abb. 7.57: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf <i>C. esculenta</i> bei Kühlung um 15°C im Verlauf der Zeit. Mittelwerte aus sieben (nach 5 s) bzw. 10 Parallelen mit einfacher Standardabweichung.	196
Abb. 7.58: Änderung der Tropfentemperatur auf <i>C. esculenta</i> im Verlauf der Zeit.	197
Abb. 7.59: Thermografisches Bild eines Tropfens (Pfeil) auf der gekühlten Oberfläche von <i>C. esculenta</i> ($a = 0$ s; $b = 6$ s; $c = 58$ s)	197

Abb. 7.60: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf <i>A. macrorrhiza</i> im Verlauf der Zeit. Mittelwerte aus sieben (Δ -5°C) bzw. neun (Δ -15°C) Parallelen mit einfacher Standardabweichung.....	198
Abb. 7.61: Änderung der Tropfentemperatur auf einer um 5°C und 15°C kühleren Oberfläche von <i>A. macrorrhiza</i> im Verlauf der Zeit.....	199
Abb. 7.62: Thermografisches Bild eines Tropfens (Pfeil) auf der um 5°C kühleren Oberfläche von <i>A. macrorrhiza</i> (a=0 s; b=3 s; c=40 s).....	199
Abb. 7.63: Thermografisches Bild eines Tropfens (Pfeil) auf der um 15°C kühleren Oberfläche von <i>A. macrorrhiza</i> (a=0 s; b=6 s; c=42 s).....	200
Abb. 7.64: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf Bolta Folie im Verlauf der Zeit. Mittelwerte aus 10 Parallelen mit einfacher Standardabweichung.....	200
Abb. 7.65: Änderung der Tropfentemperatur auf einer um 15°C kühleren Oberfläche von Bolta Folie im Verlauf der Zeit.....	201
Abb. 7.66: Thermografisches Bild eines Tropfens (Pfeil) auf der um 15°C kühleren Oberfläche von Bolta-Folie (a=0 s; b=4 s; c=51 s).....	201
Abb. 7.67: Kondensationstropfen (Pfeile) in der unmittelbaren Umgebung eines abgesetzten Tropfens bei Kühlung der Oberfläche um -15°C, beobachtet auf <i>Brassica oleracea</i>	202
Abb. 7.68: Schematische Darstellung der möglichen Nukleation von Wasser bei Kondensation auf Oberflächen mit Röhrchenwachsen (a) und mit Wachsschuppen (b).....	211
Abb. 7.69: Angenommenes Vorkommen von benetzten sowie unbenetzten Arealen auf einer Oberfläche im Übergangsstadium zwischen Cassie- und Wenzel-Zustand.....	213
Abb. 7.70: Schematischer Aufbau der verwendeten Oberflächen; a) Bolta Folie b) Circuit foil mit abstrahierten, übereinander gelagerten Sinuskurven (orange, gelb) c) Creavis-Spray d) Mincor®-Spray.....	217

14. Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Verwendete Blütenpflanzen	7
Tab. 2.2: Verwendete Algen	8
Tab. 2.3: Verwendete technische Oberflächen	9
Tab. 4.1: Verwendete Weizensorten	63
Tab. 4.2: Kontaktwinkel (n = 15, \pm 1 SD) der untersuchten Weizensorten*	71
Tab. 4.3: Restkontamination nach Selbstreinigungstest (n = 40, \pm 1 SD)*	72
Tab. 4.4: Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen: Auswirkung der Faktoren Wachs (intakt/zerstört) und Sorte auf die Konidienanzahl (* p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001; ns nicht signifikant)	81
Tab. 4.5: Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalysen: Auswirkung der Faktoren Wachs (intakt/zerstört) und Sorte auf die Konidienanzahl (* p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001; ns nicht signifikant)	82
Tab. 5.1: Versuchszeiträume der Untersuchung zum Pilzbefall von Lotus	96
Tab. 5.2: Kennzeichnung der Lotus-Versuchsvarianten	97
Tab. 5.3: Klasseneinteilung der Flächenbelegung mit Pilz bei <i>N. nucifera</i>	100
Tab. 5.4: Strahlungsbedingungen an den Lotus-Versuchsvarianten zu zwei verschiedenen Uhrzeiten gemessen am 10.09.2004	104
Tab. 5.5: Wöchentliche Niederschläge in Millimetern. Rot markiert sind Wochen mit wenig oder keinem Niederschlag. (Daten: Meteorologisches Institut, Bonn)	108
Tab. 6.1: Mögliche Schutzmaßnahmen gegen MO-Bewuchs (verändert nach Sand, 1995)	124
Tab. 6.2: Übersicht der verwendeten Proben inklusive ihrer Versuchsbezeichnungen	130
Tab. 6.3: Versuchsbedingungen der beiden Durchläufe NA I und NA II	132
Tab. 6.4: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung bei Fassadenfarben (n = 11, FW: n = 12)	140
Tab. 6.5: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung bei Dachziegeln (n = 10)	140
Tab. 7.1: Verwendete Pflanzen	153
Tab. 7.2: Übersicht der verwendeten technischen Oberflächen inklusive ihrer Versuchsbezeichnungen	153
Tab. 7.3: Verwendete Pflanzen bei KW-Messungen mit Glycerin	156
Tab. 7.4: Angenommene Benetzungszustände des Wassers auf pflanzlichen Oberflächen in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur (+ Cassie-Zustand; - Wenzel-Zustand; +/- Übergangs-Zustand)	212

Anhang

- A: Bildtafeln**
- B: Daten: Modellsystem Weizen und Mehltau: Auswirkungen von Niederschlägen auf den Befall unter Laborbedingungen**
- C: Daten: Modellsystem Lotus und Mehltau: Auswirkungen von Niederschlägen auf den Befall unter Freilandbedingungen**
- D: Daten: Modellsystem Algen und Baustoffe: Wachstum in Abhängigkeit der Benetzbarkeit**
- E: Daten: Einfluss der Kondensation auf die Superhydrophobie**

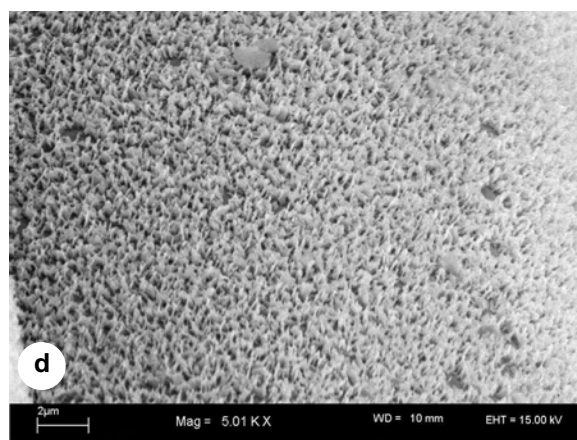
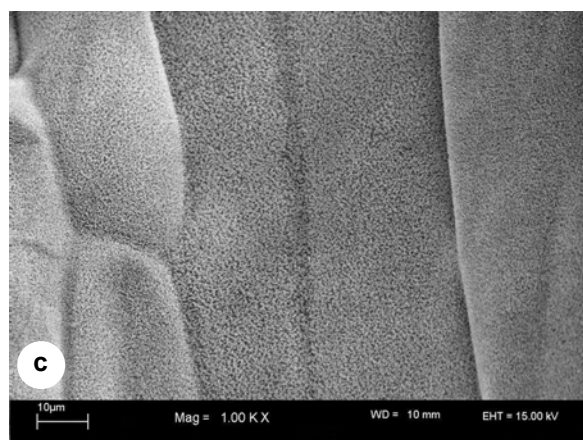
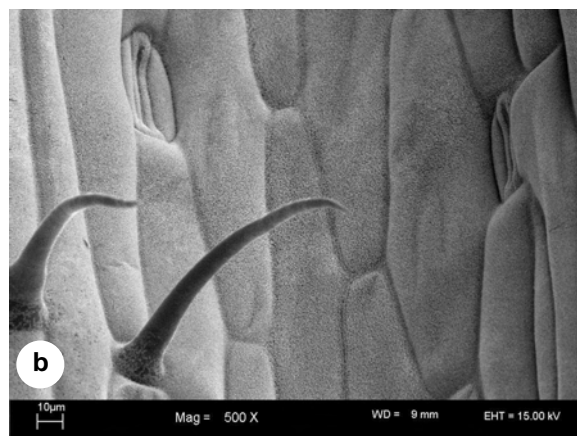
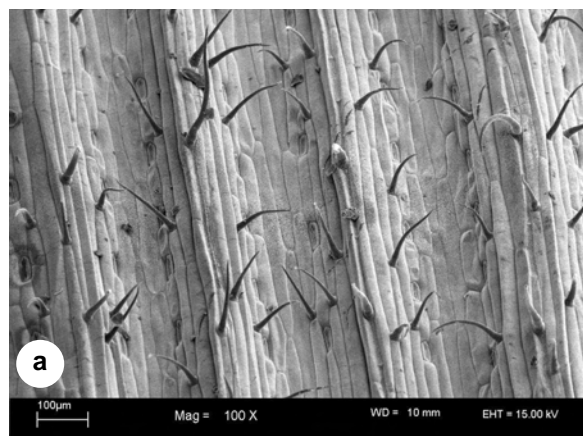
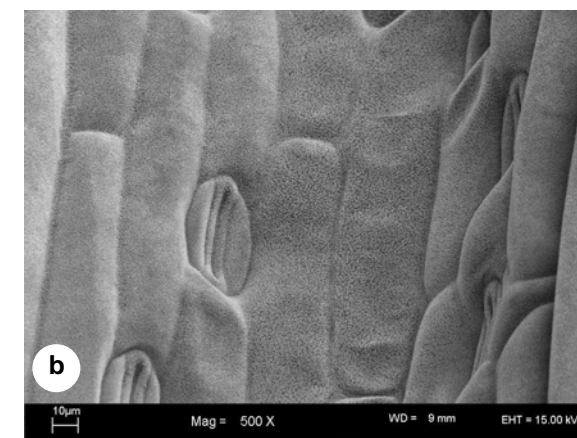
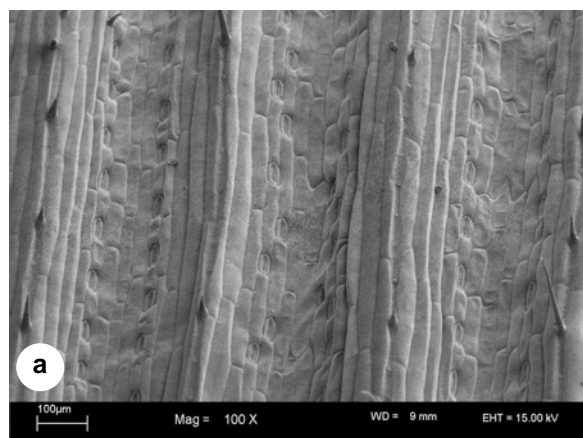
A: Bildtafeln

Abb. A1: *Triticum aestivum* var. *Kanzler* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 5010x)



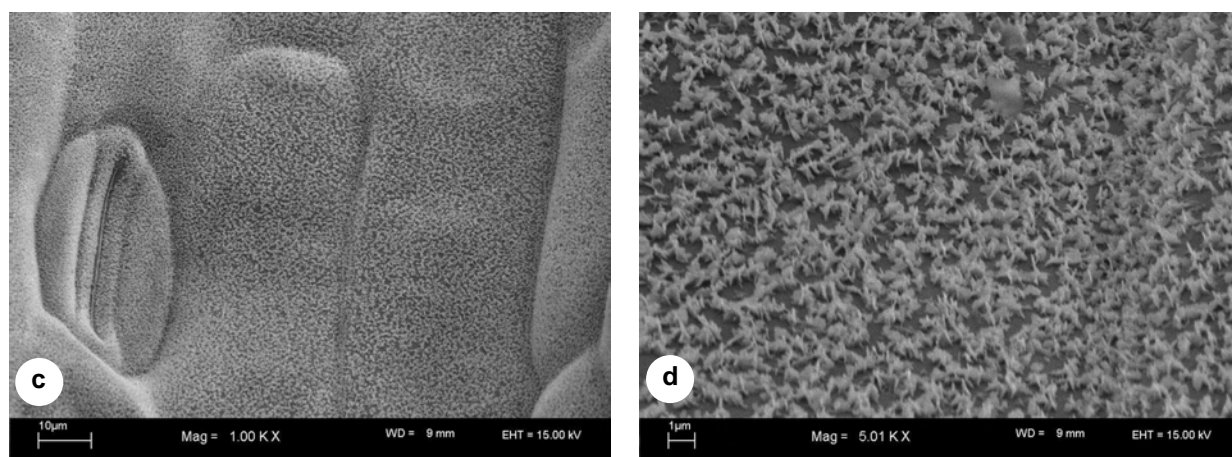


Abb. A2: *Triticum aestivum* var. *Kris* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 5010x)

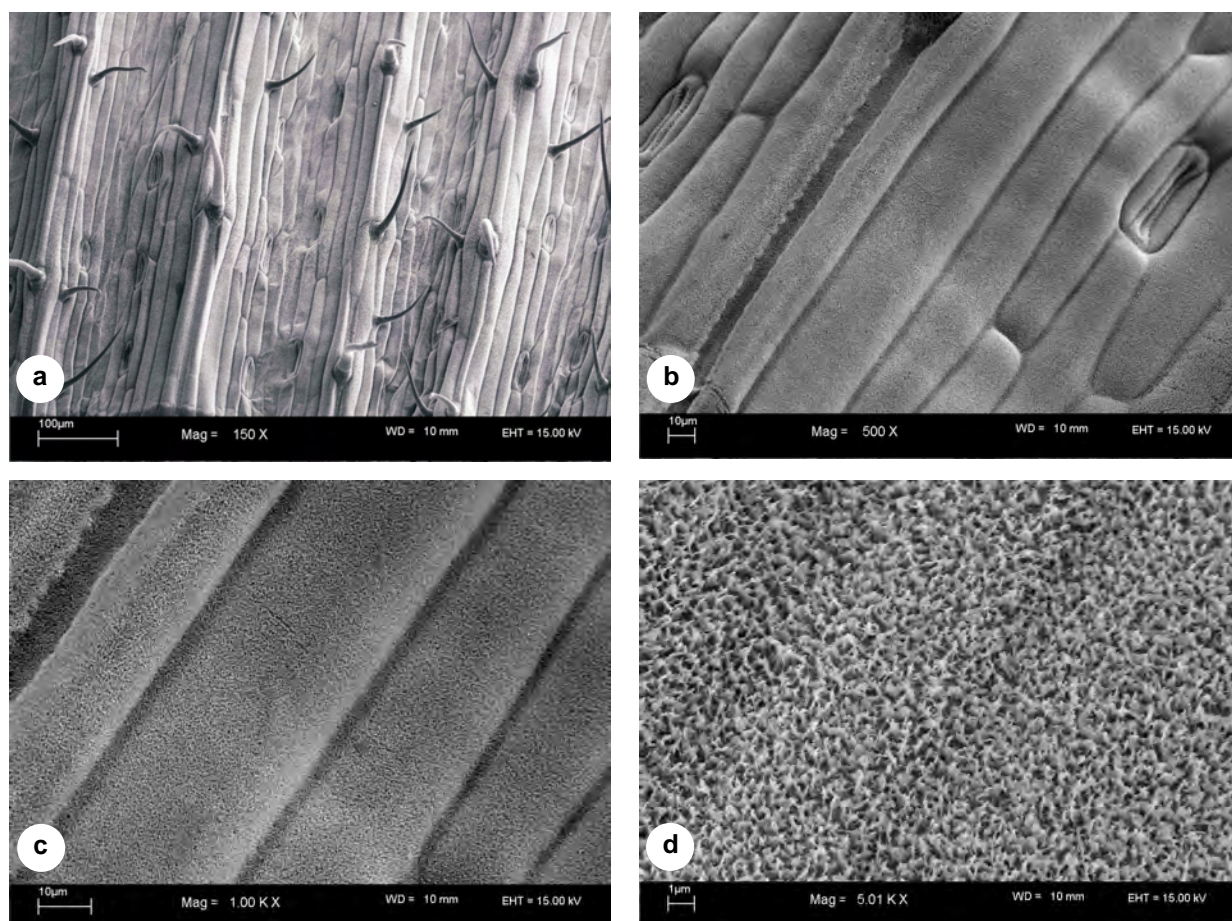


Abb. A3: *Triticum aestivum* var. *Ludwig* (Vergrößerung: a 150x; b 500x; c 1000x; d 5010x)

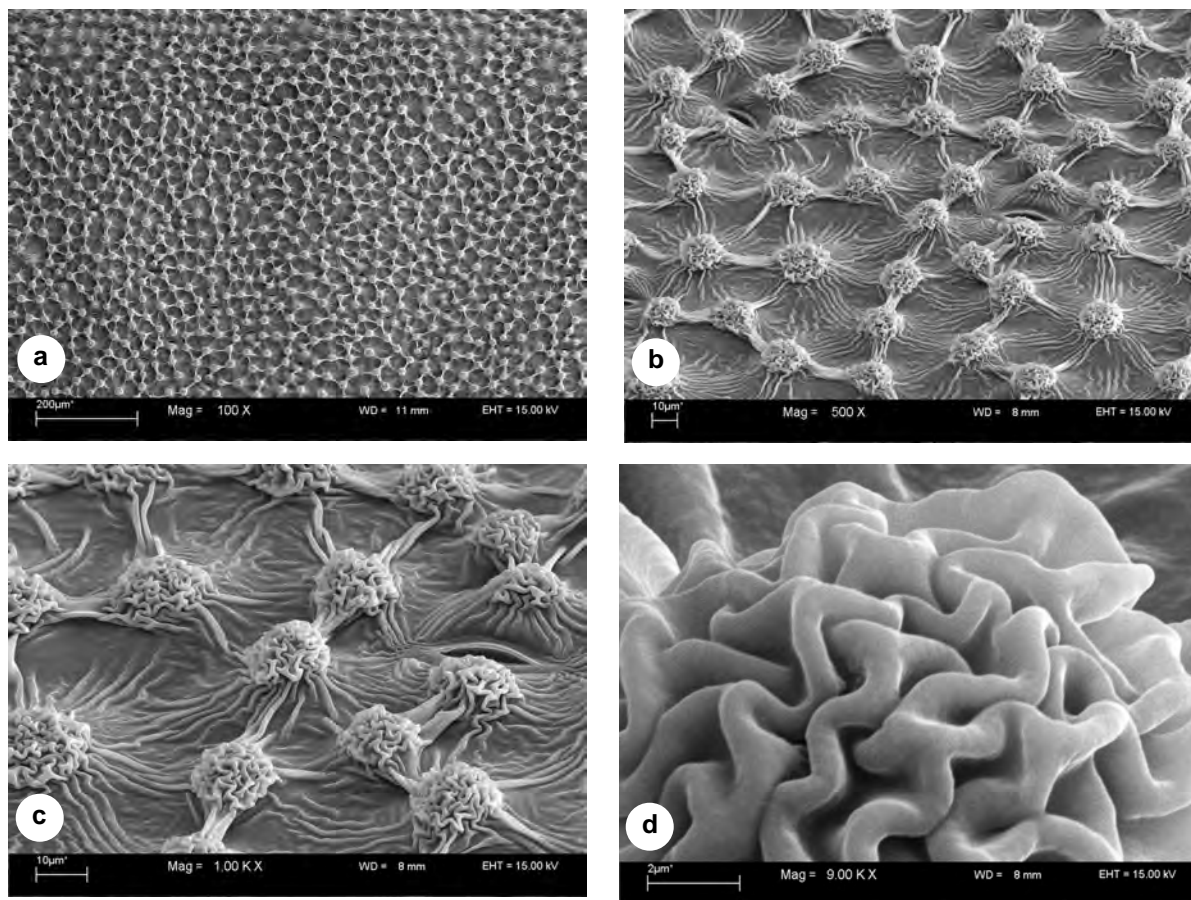
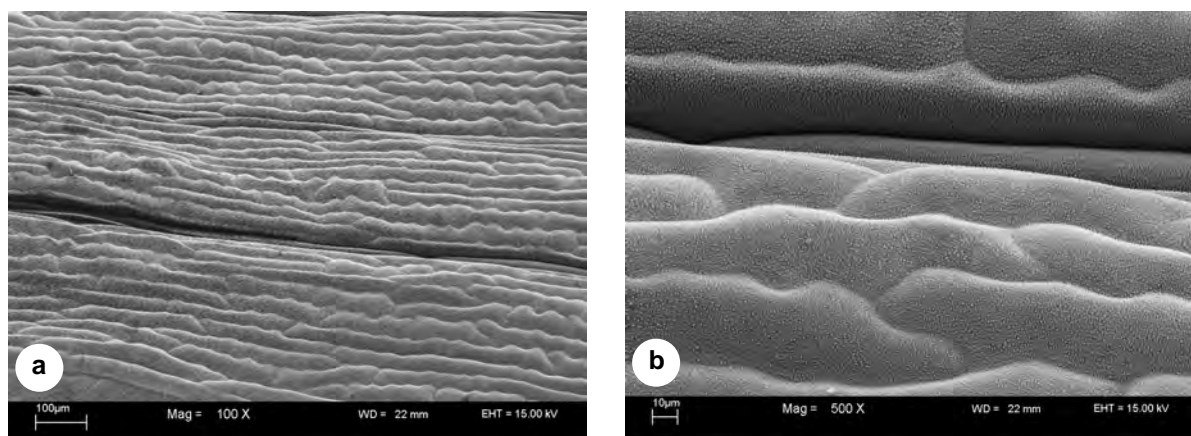


Abb. A4: *Alocasia macrorrhiza* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)



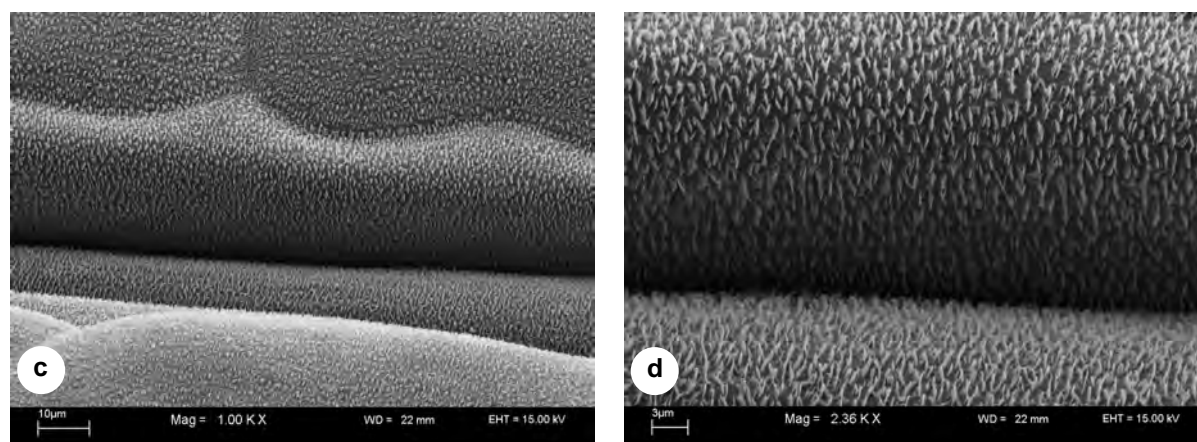


Abb. A5: *Alstroemeria aurantiaca* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 2360x)

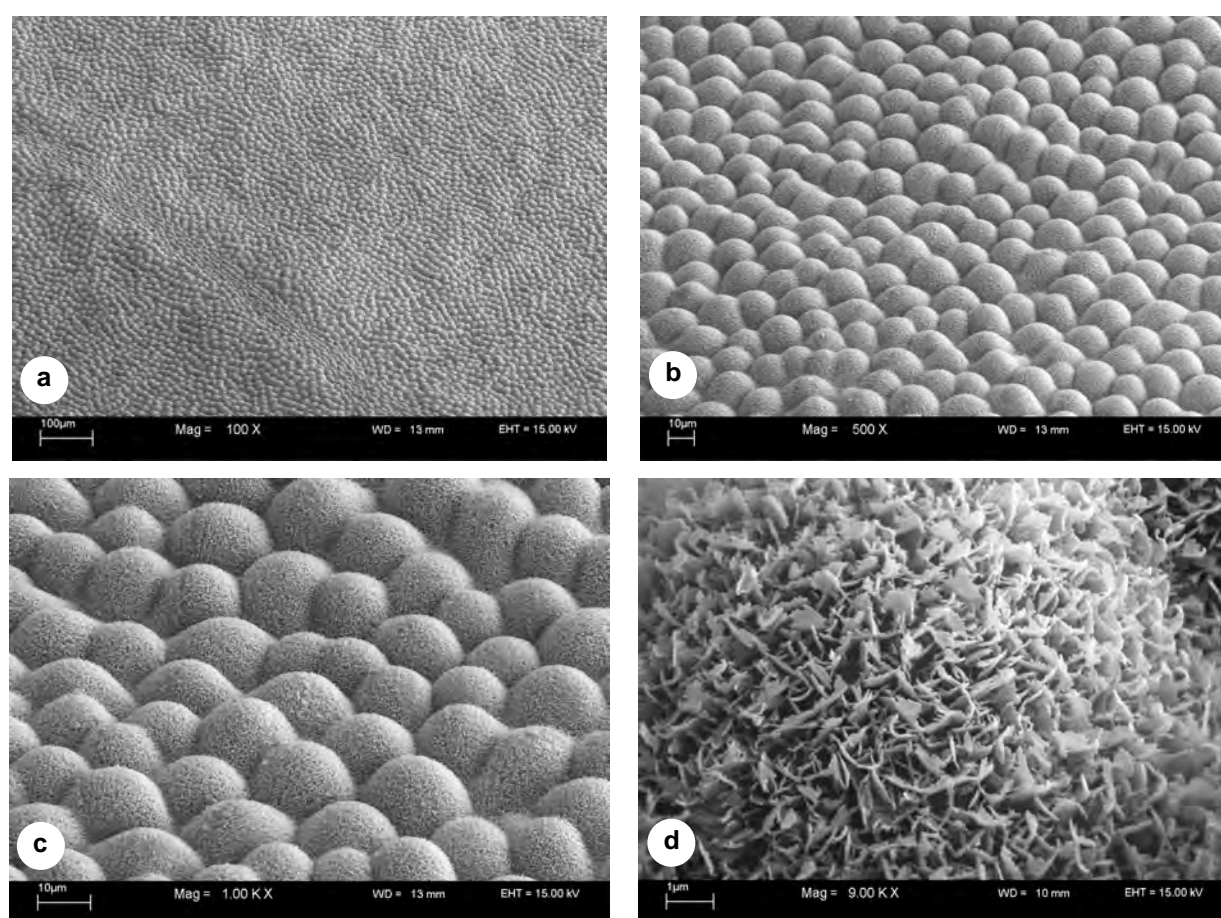


Abb. A6: *Apocynum cannabinum* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

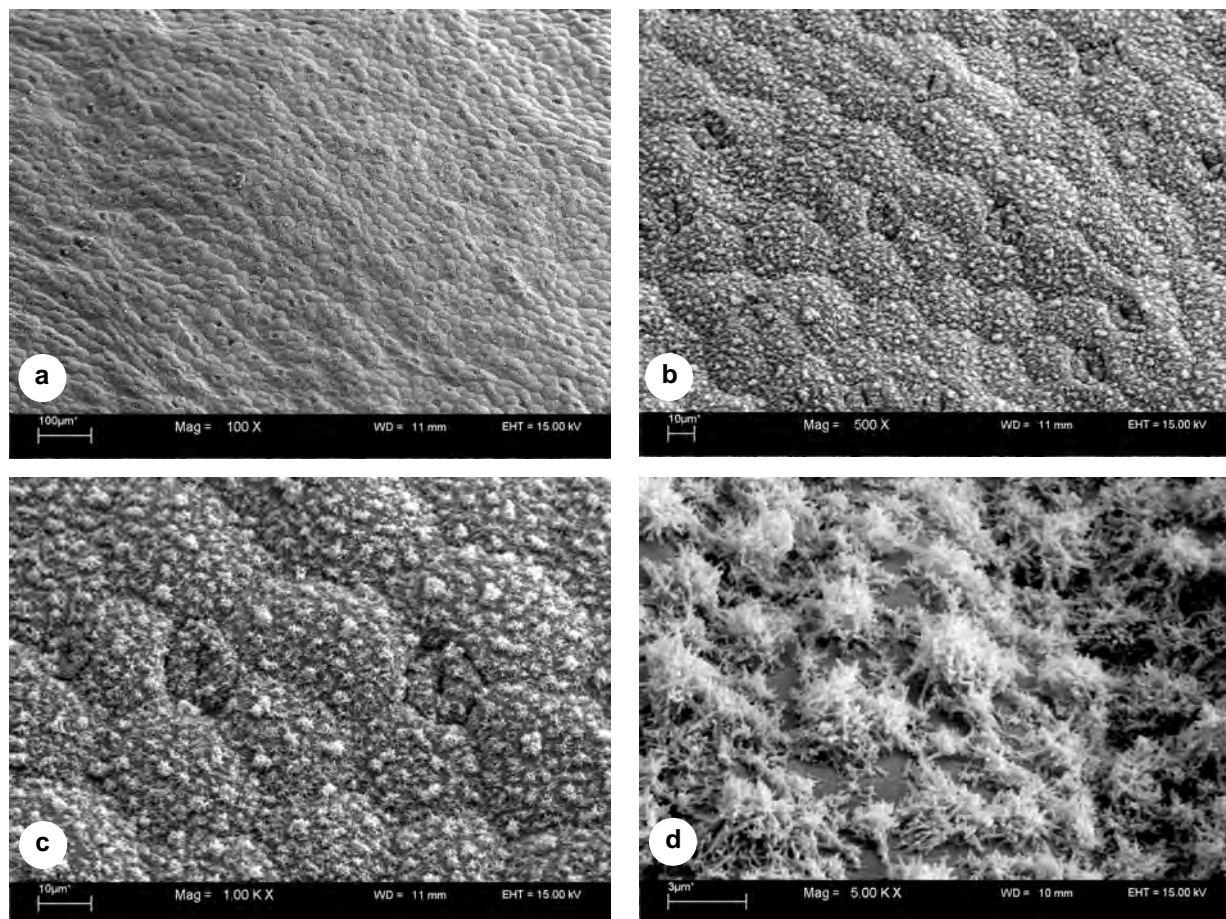
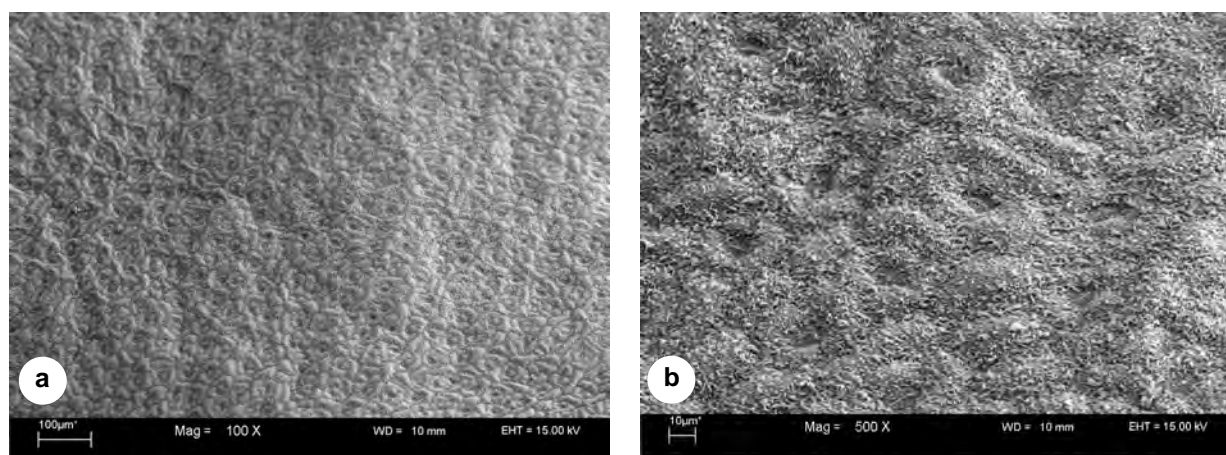


Abb. A7: *Argemone mexicana* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 5000)



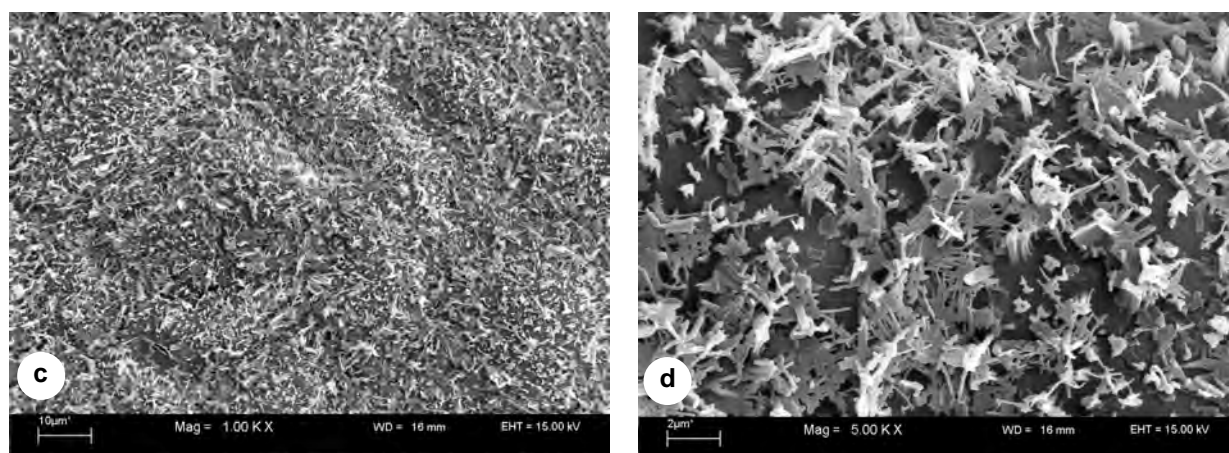


Abb. A8: *Brassica oleracea* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 5000)

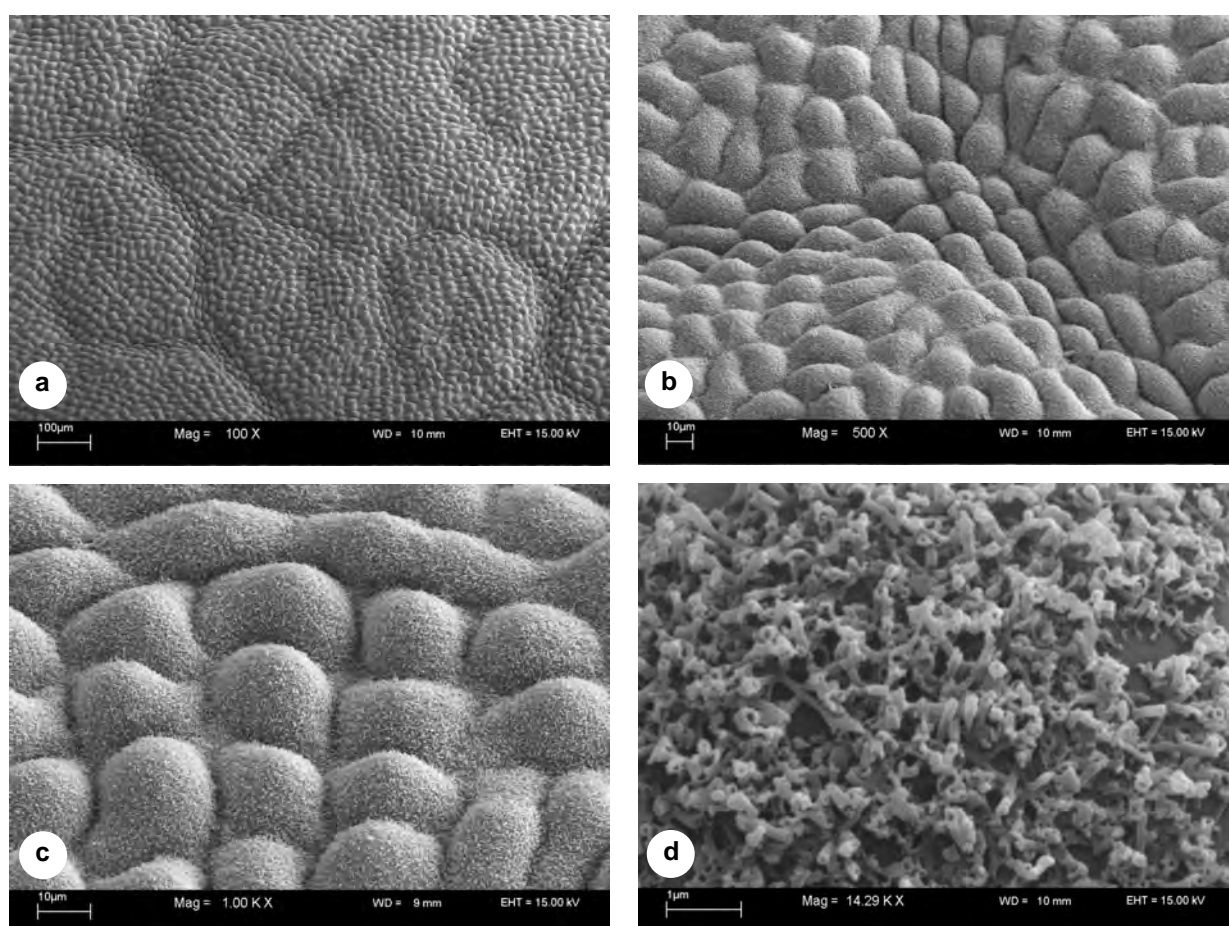


Abb. A9: *Cercidiphyllum japonicum* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 14290x)

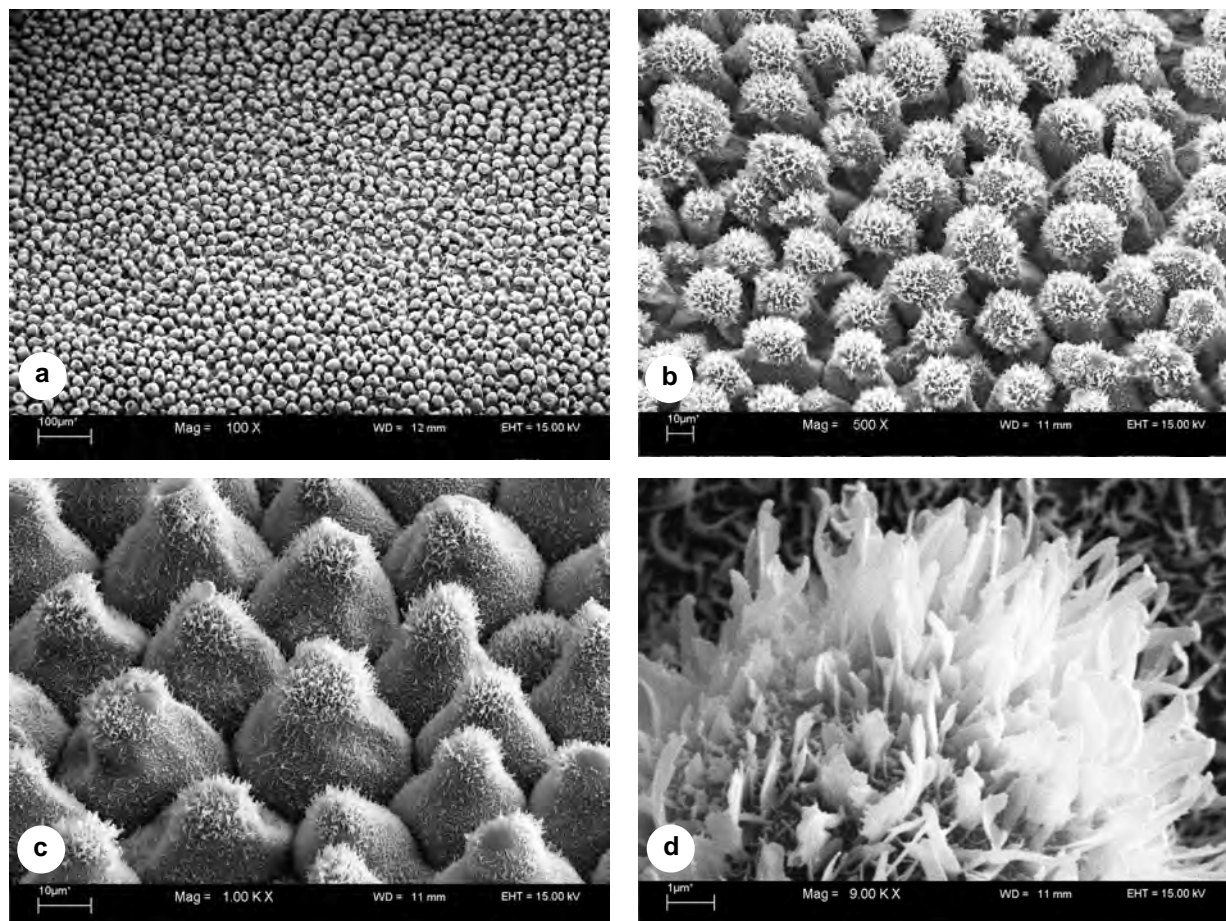
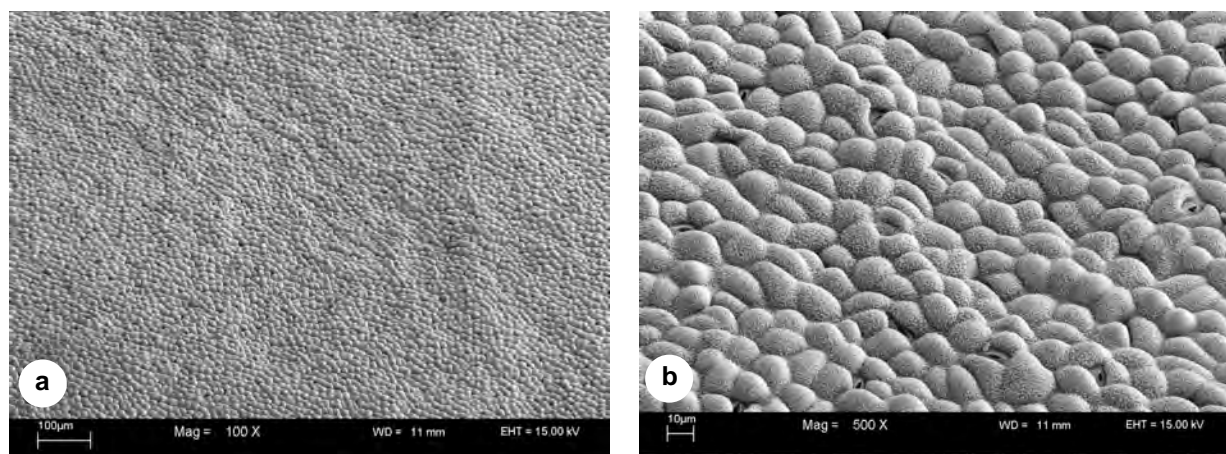


Abb. A10: *Colocasia esculenta* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)



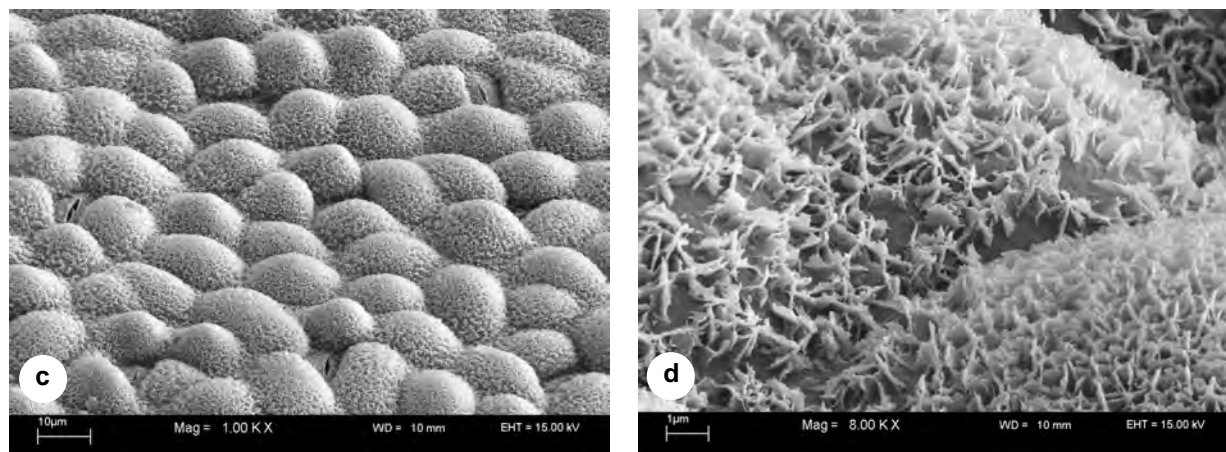


Abb. A11: *Halimodendron halodendron* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 8000x)

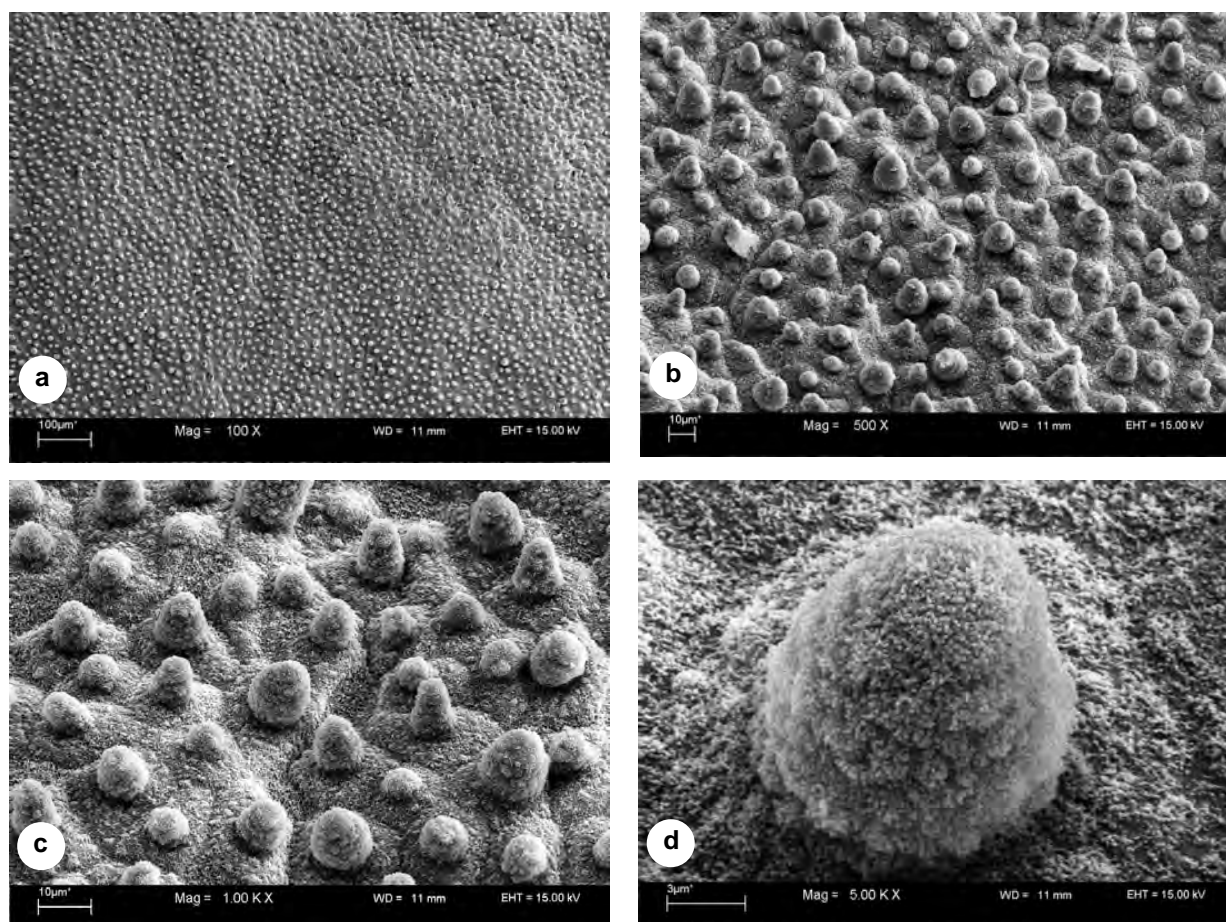


Abb. A12: *Nelumbo nucifera* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 5000x)

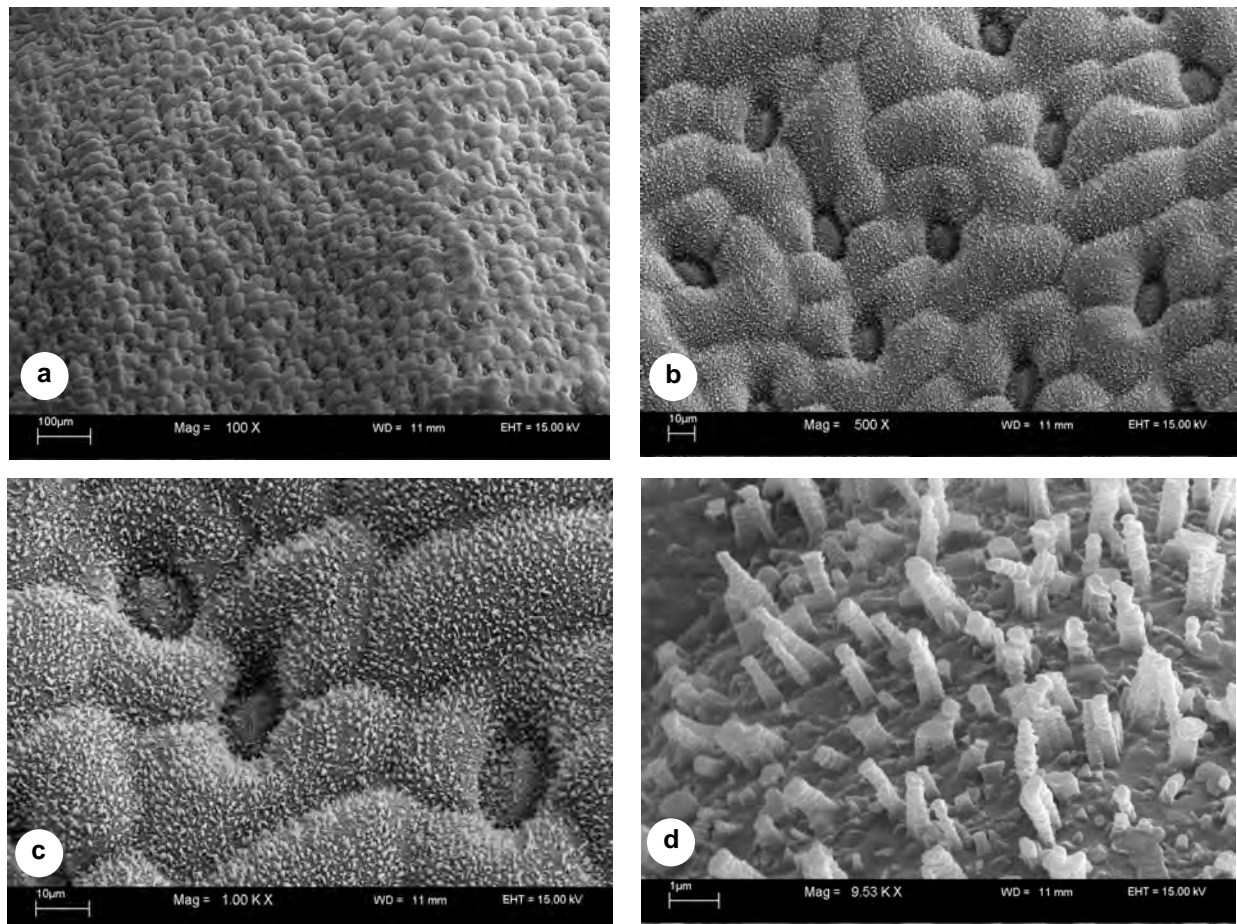
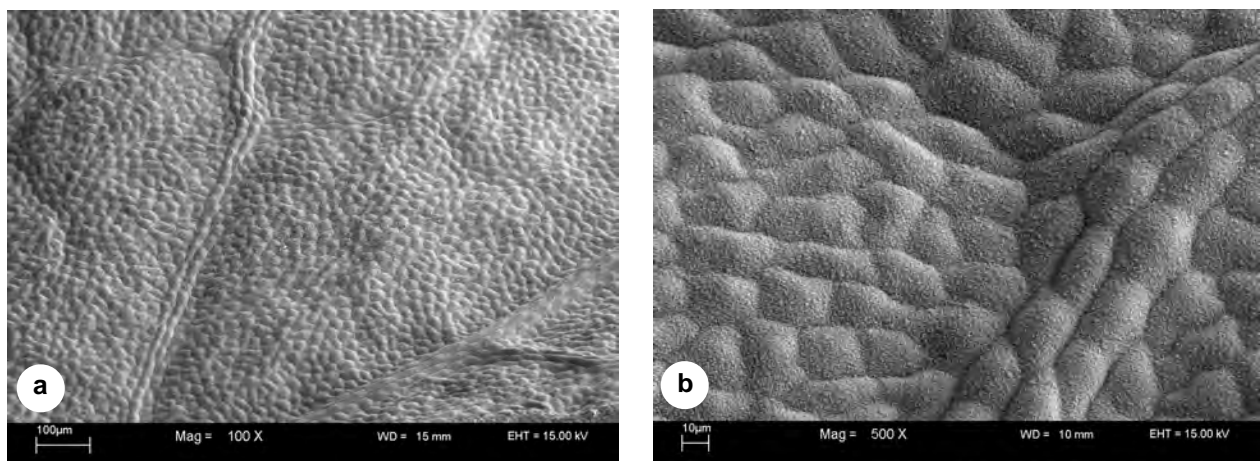


Abb. A13: *Silene vulgaris* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9530x)



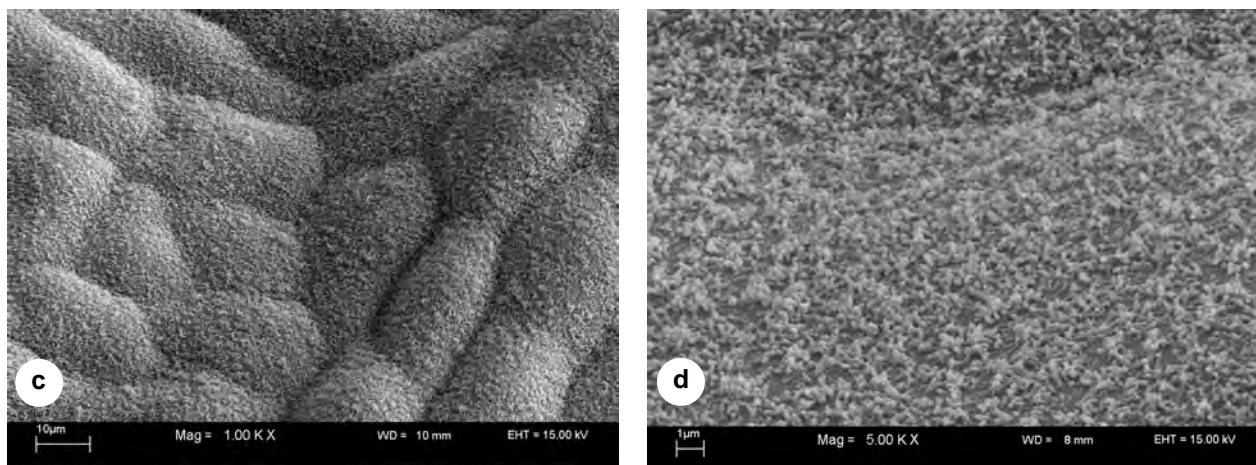


Abb. A14: *Thalictrum flavum* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 5000x)

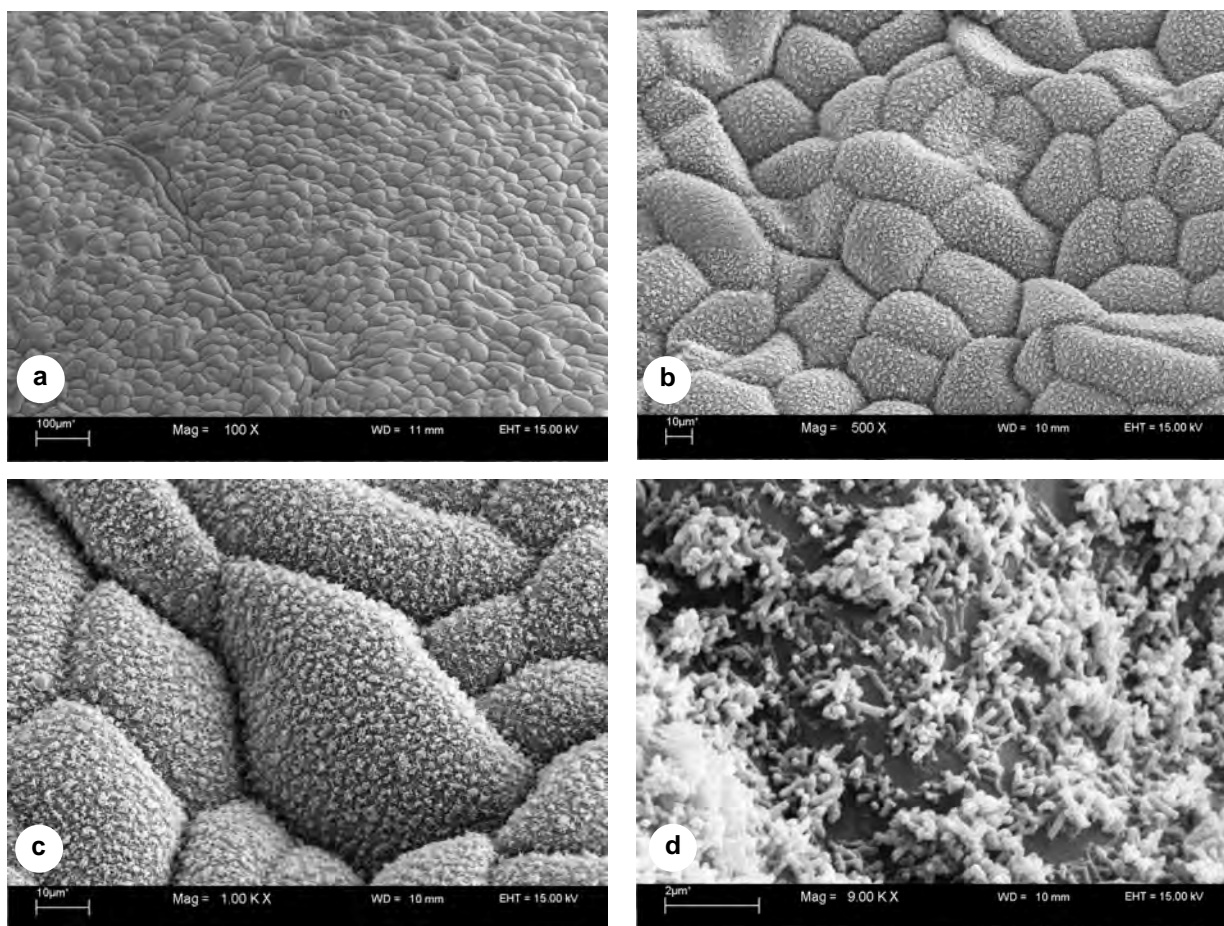


Abb. A15: *Tropaeolum majus* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

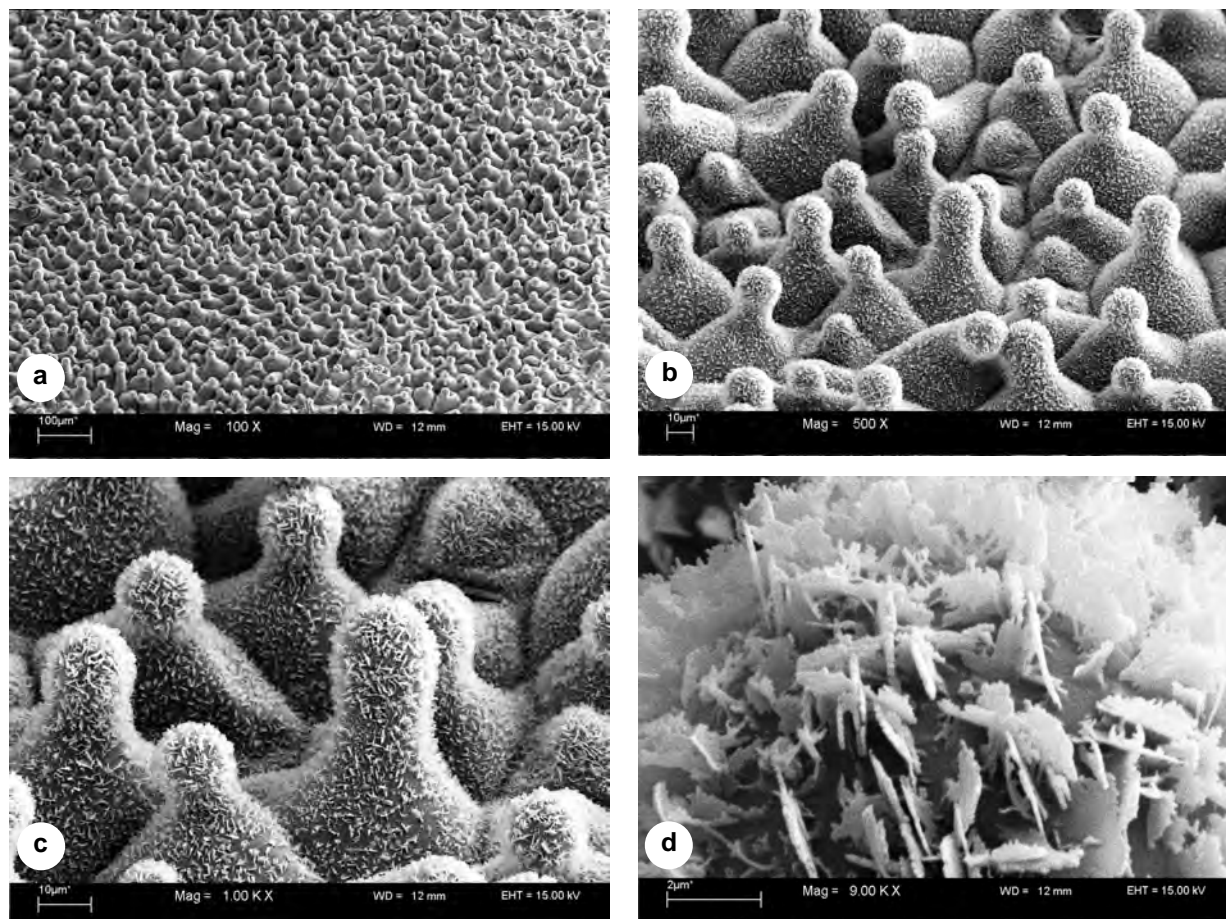
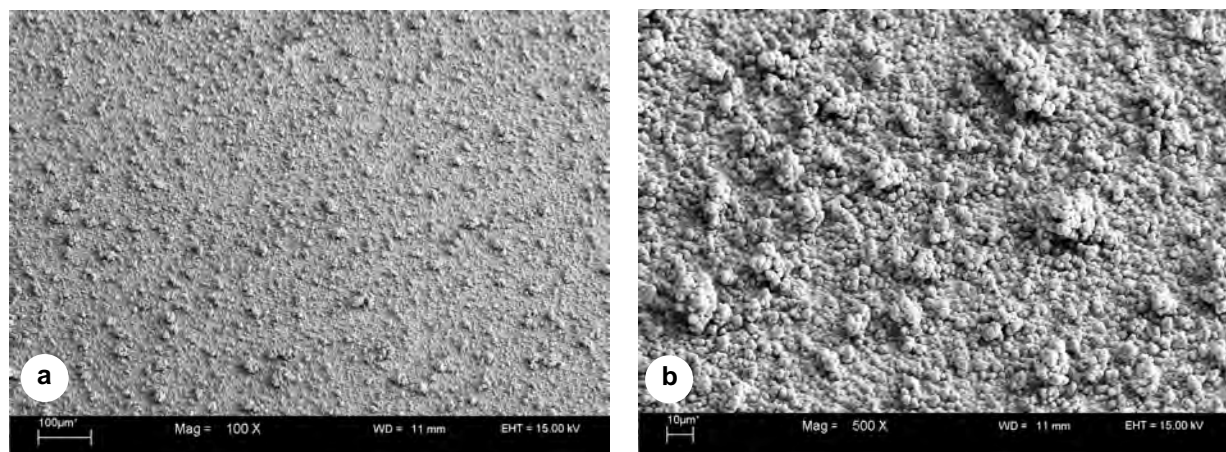


Abb. A16: *Xanthosoma robustum* (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)



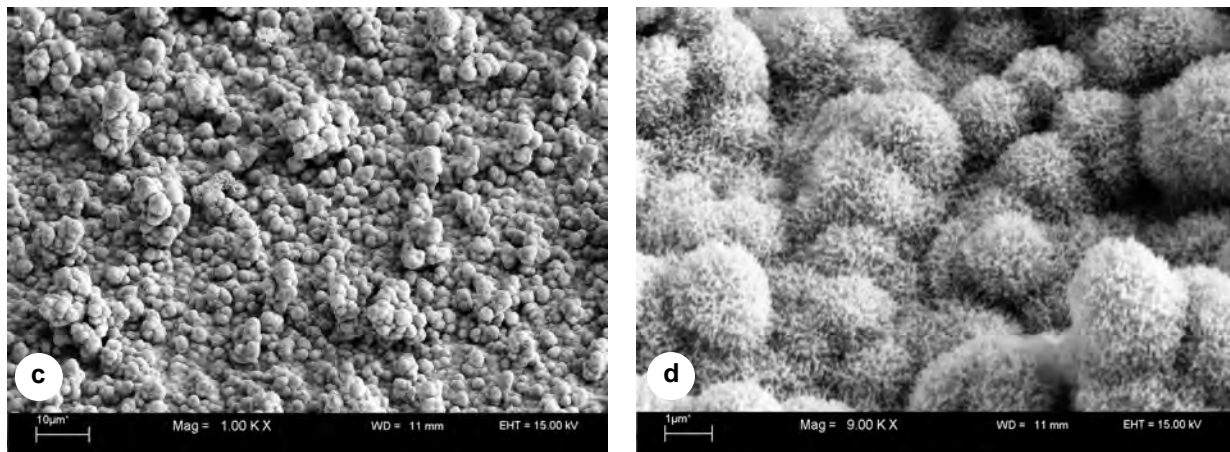


Abb. A17: Bolta Folie (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

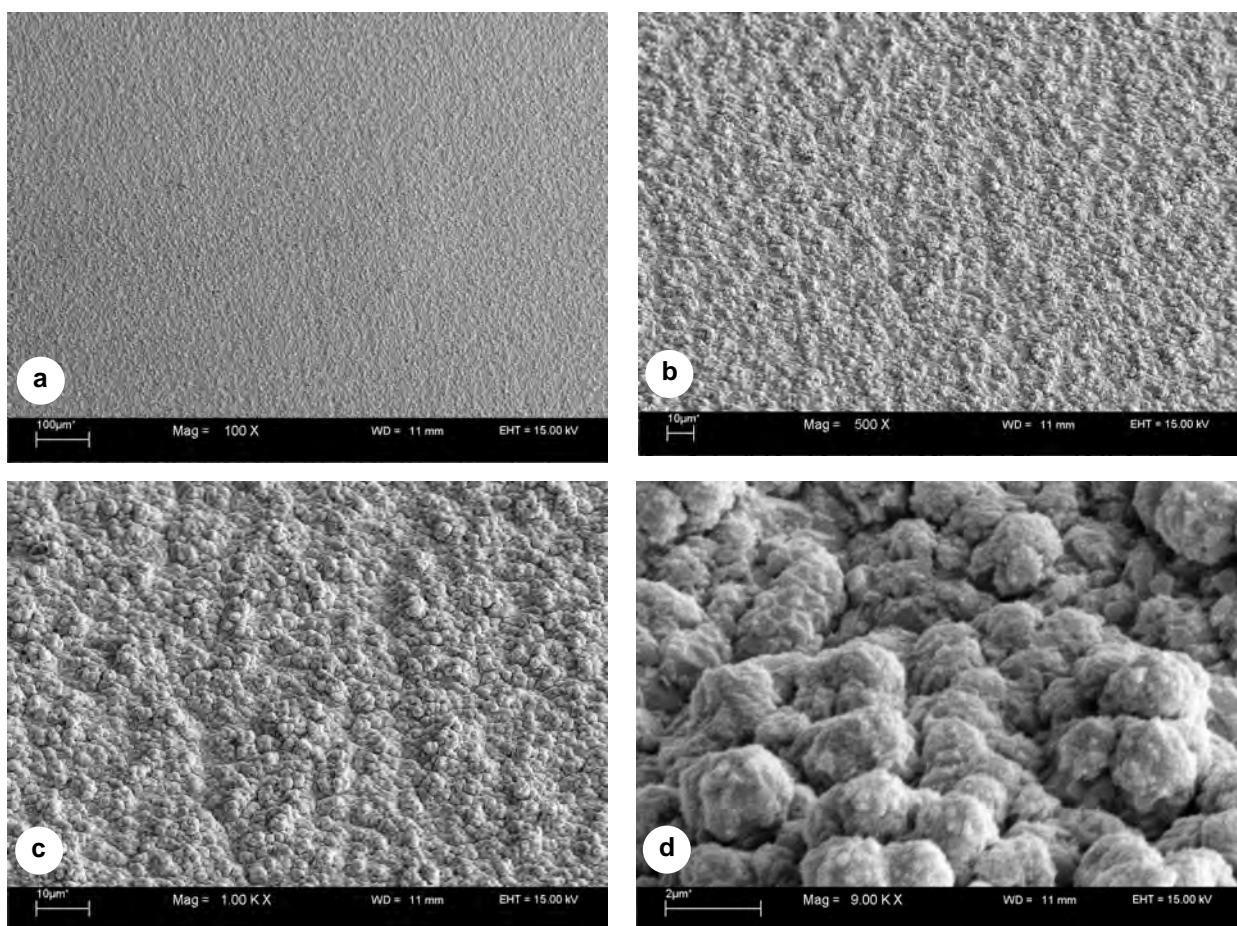


Abb. A18: Circuit foil (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

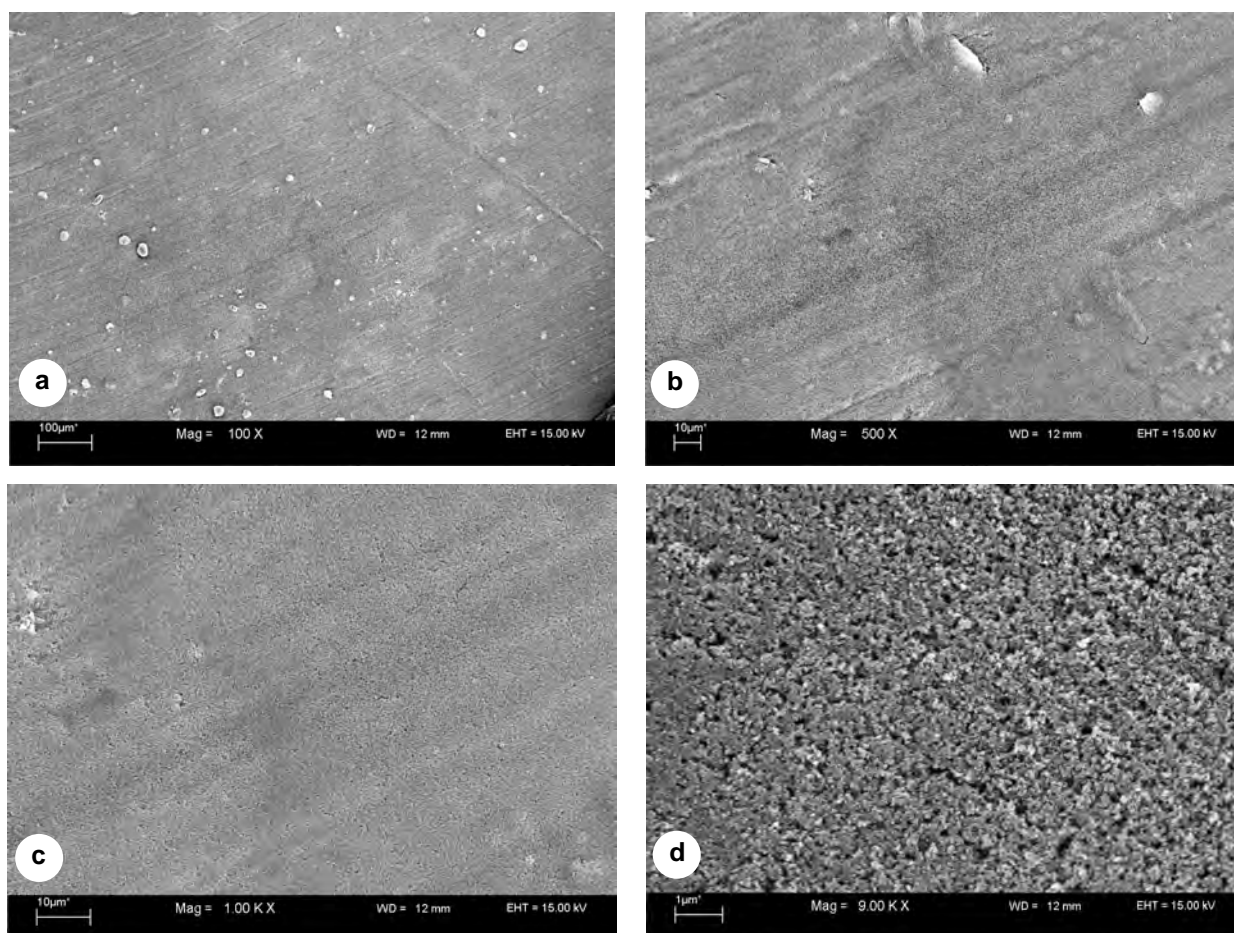
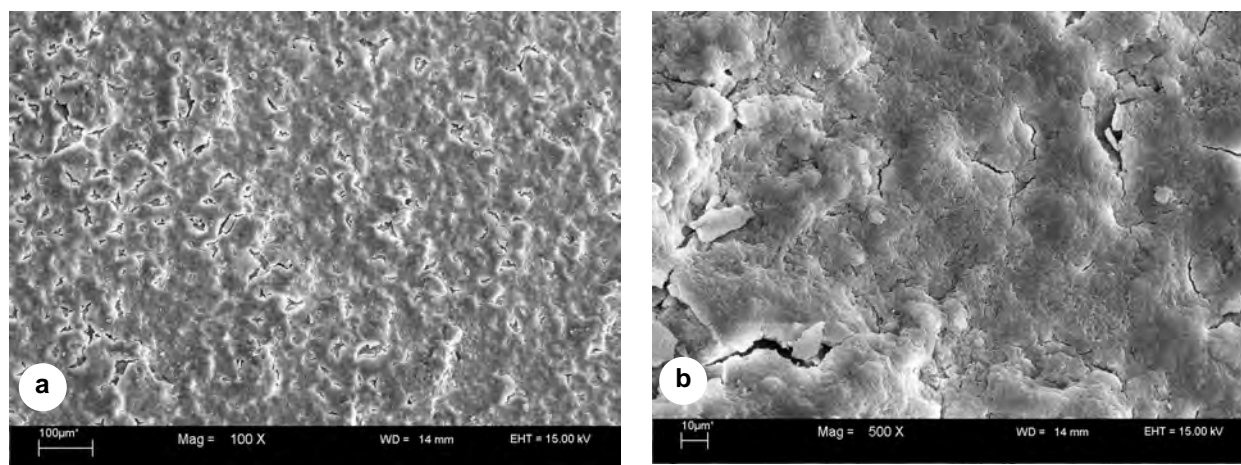


Abb. A19: Mincor®-Spray (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)



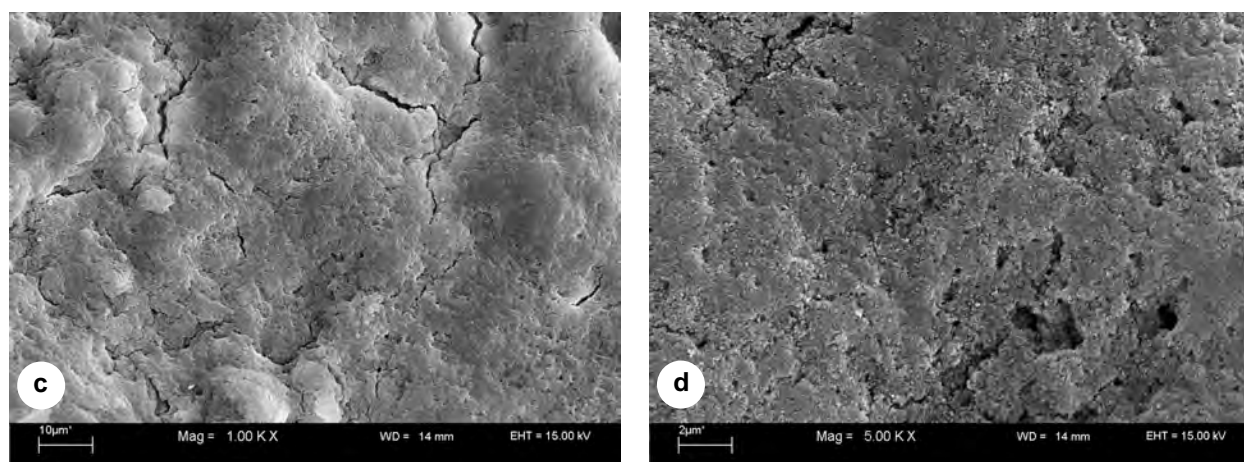


Abb. A20: Creavis-Spray (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 5000x)

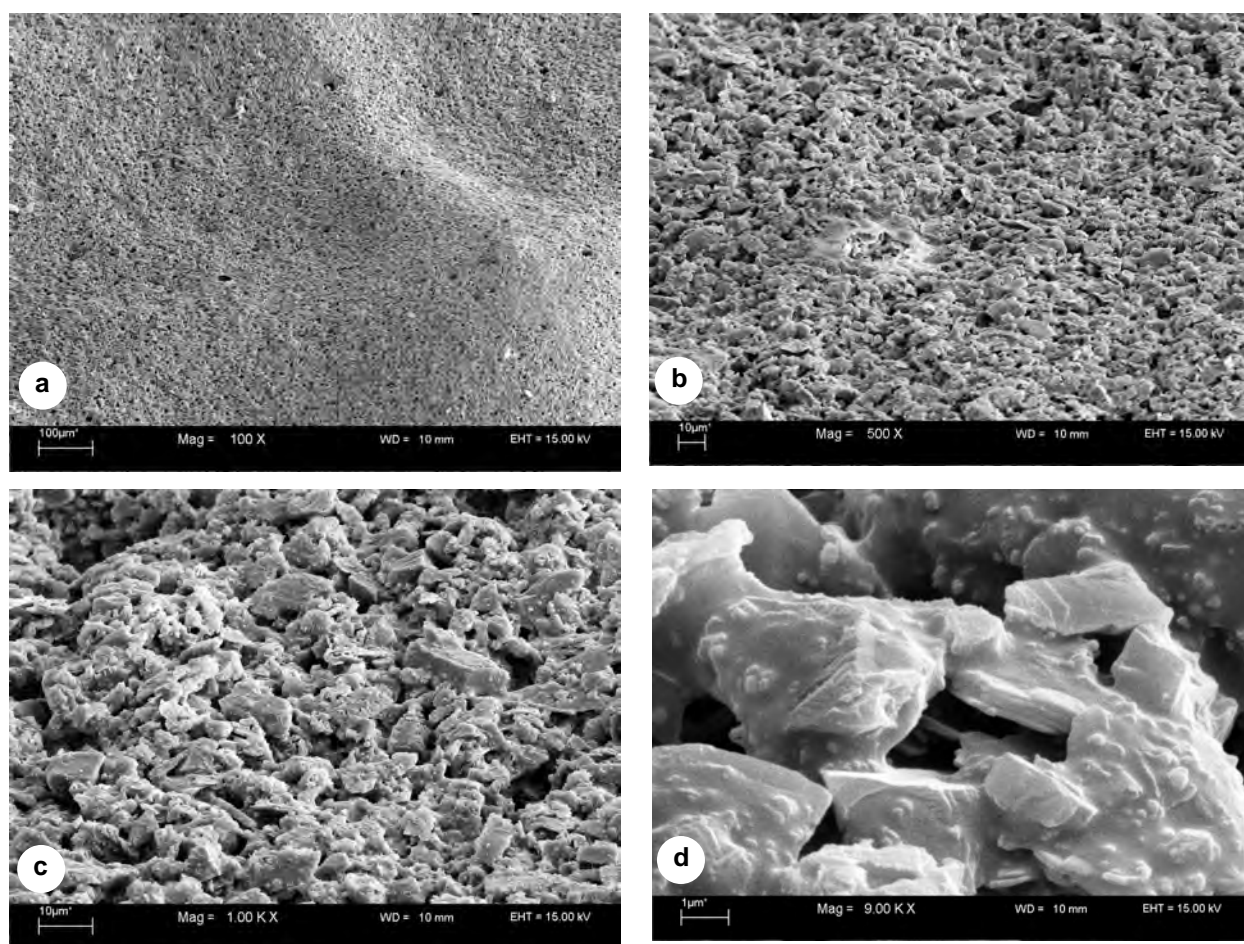


Abb. A21: Dispersionsfarbe (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

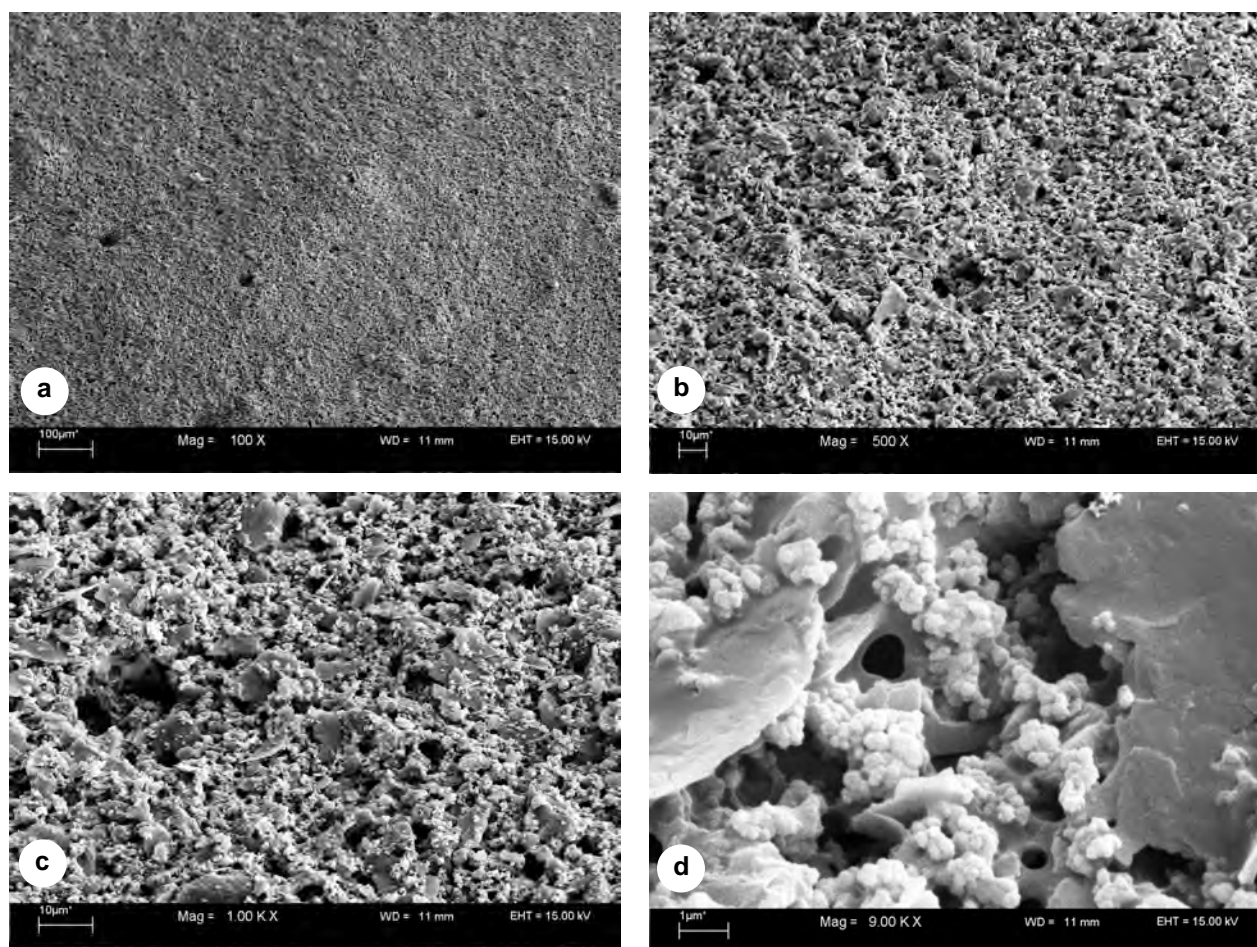
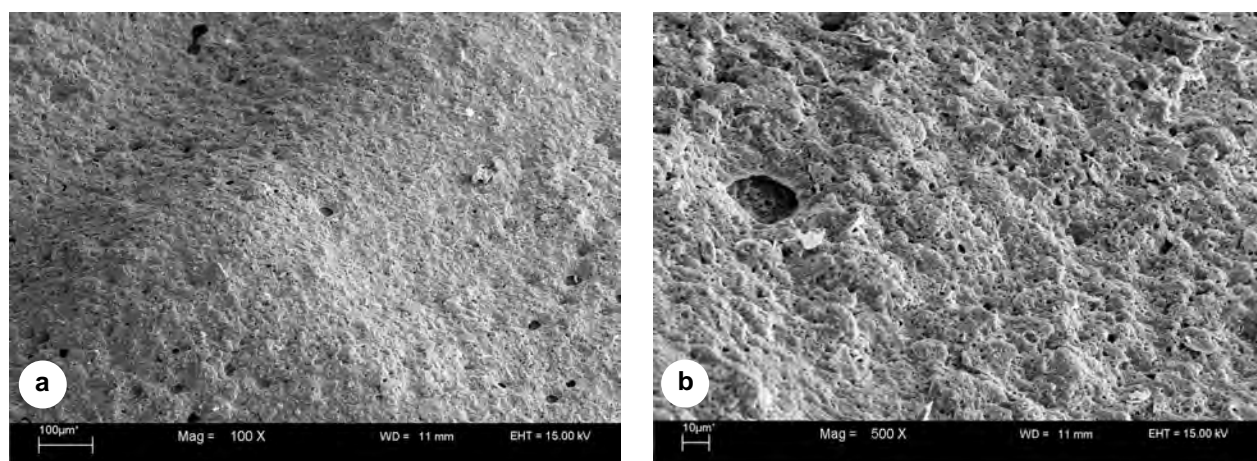


Abb. A22: Silikatfarbe (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)



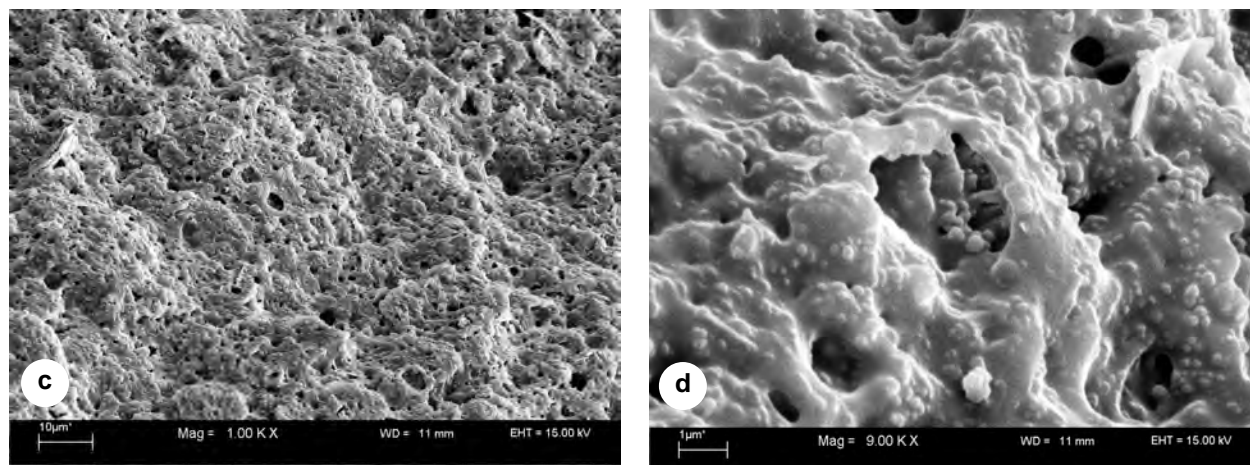


Abb. A23: Silikonharzfarbe (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

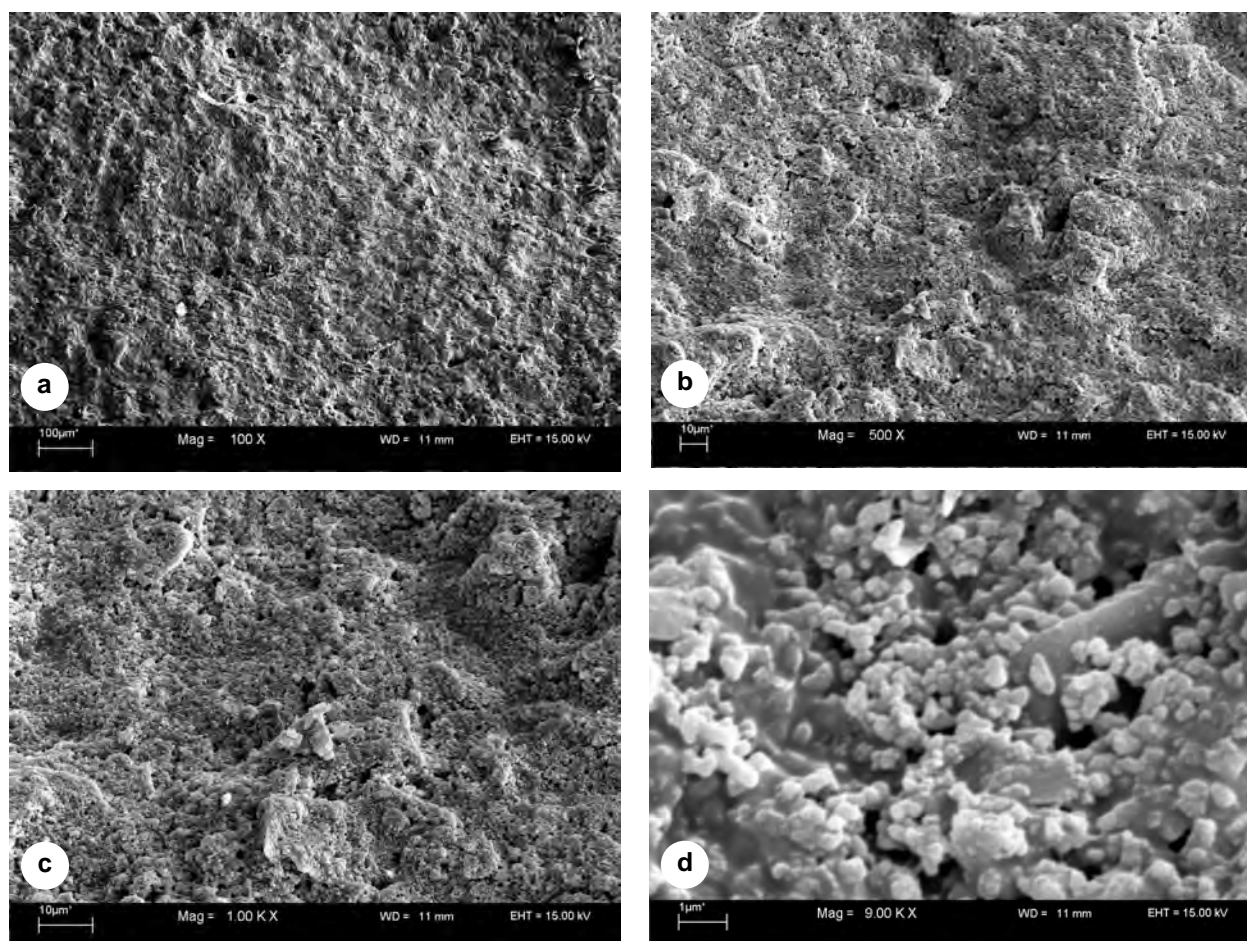


Abb. A24: Fassadenfarbe „Lotusan®“ (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

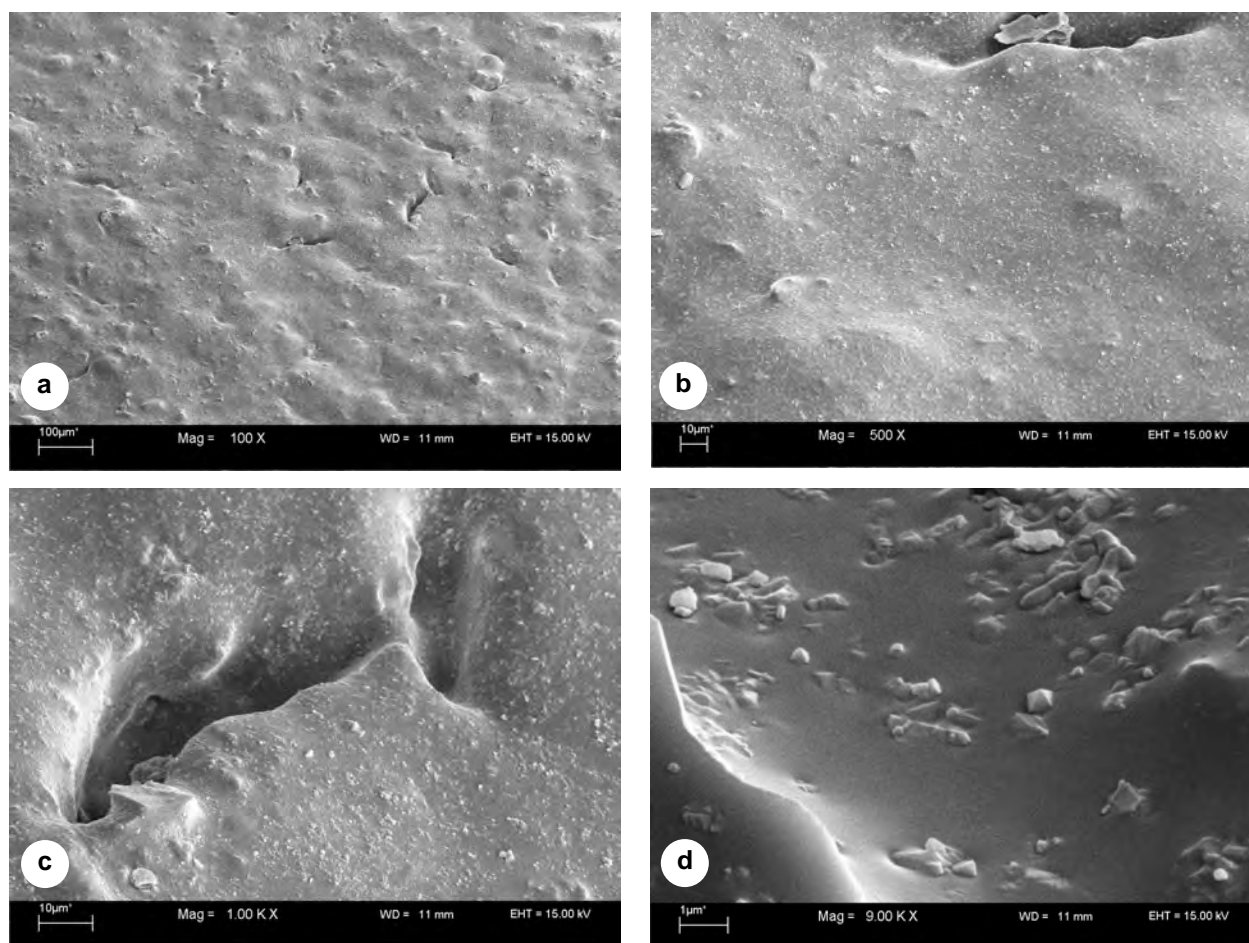
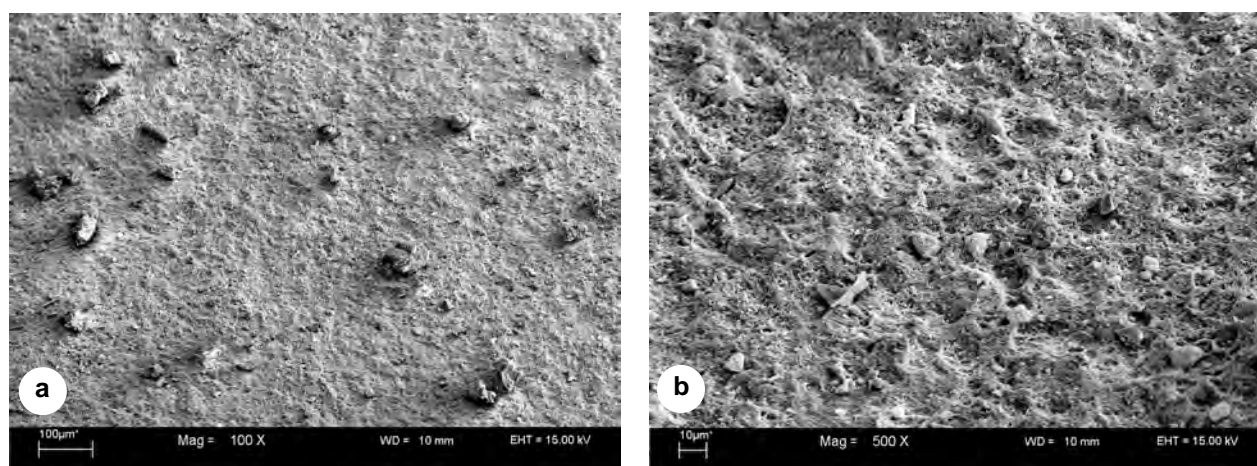


Abb. A25: Tondachziegel (schwarz) (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)



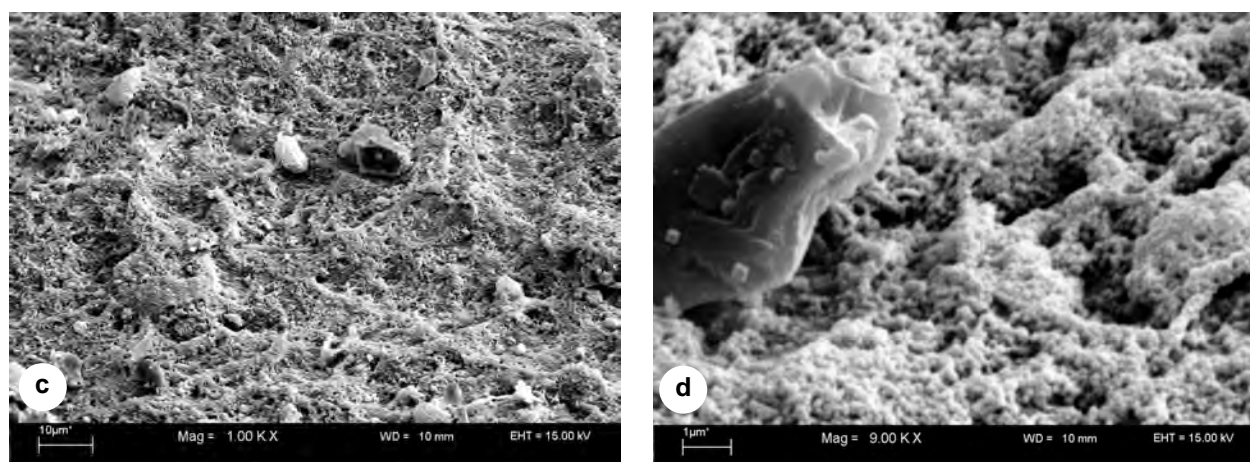


Abb. A26: Tondachziegel (rot) (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

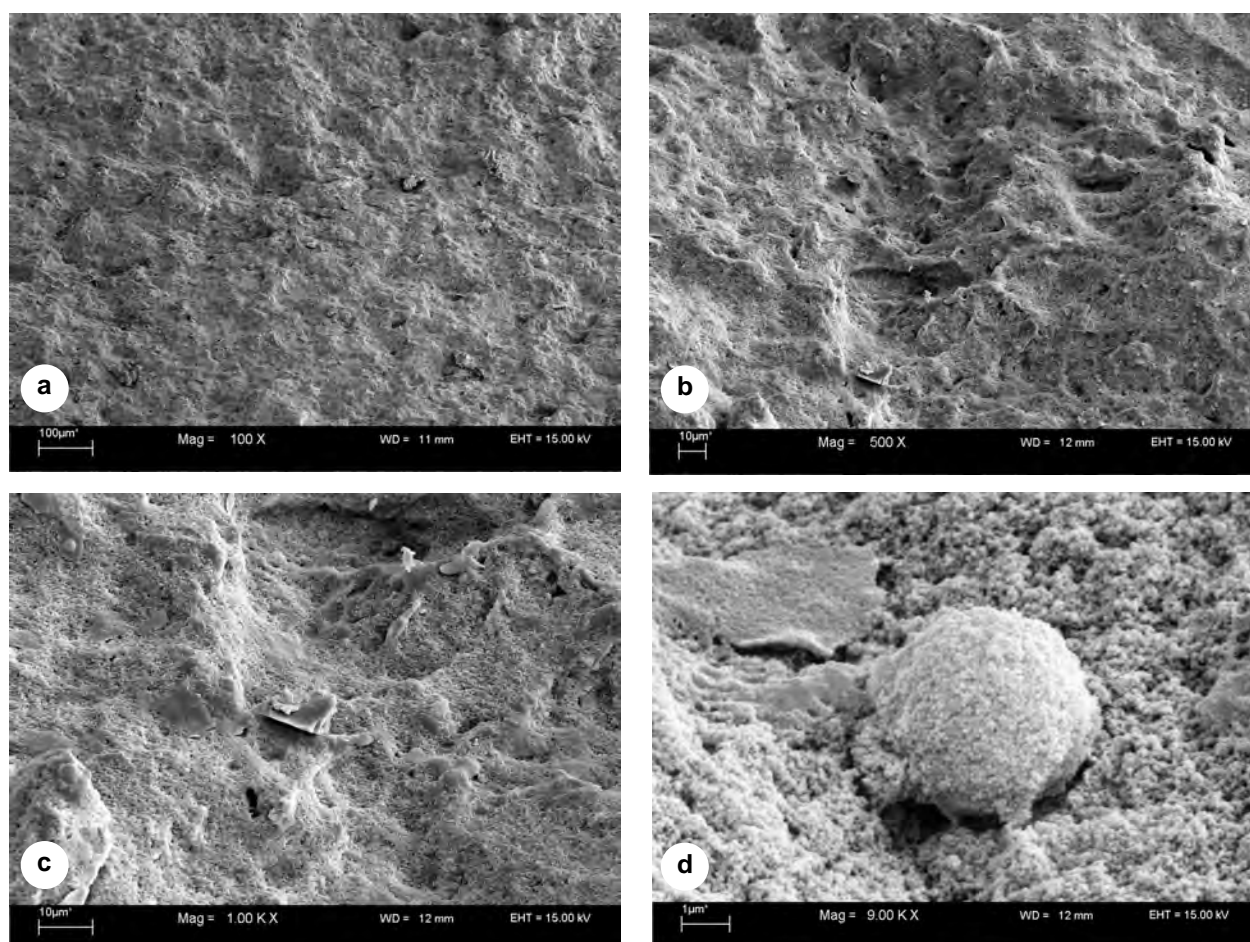


Abb. A27: Funktionaler Dachziegel (rot) (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

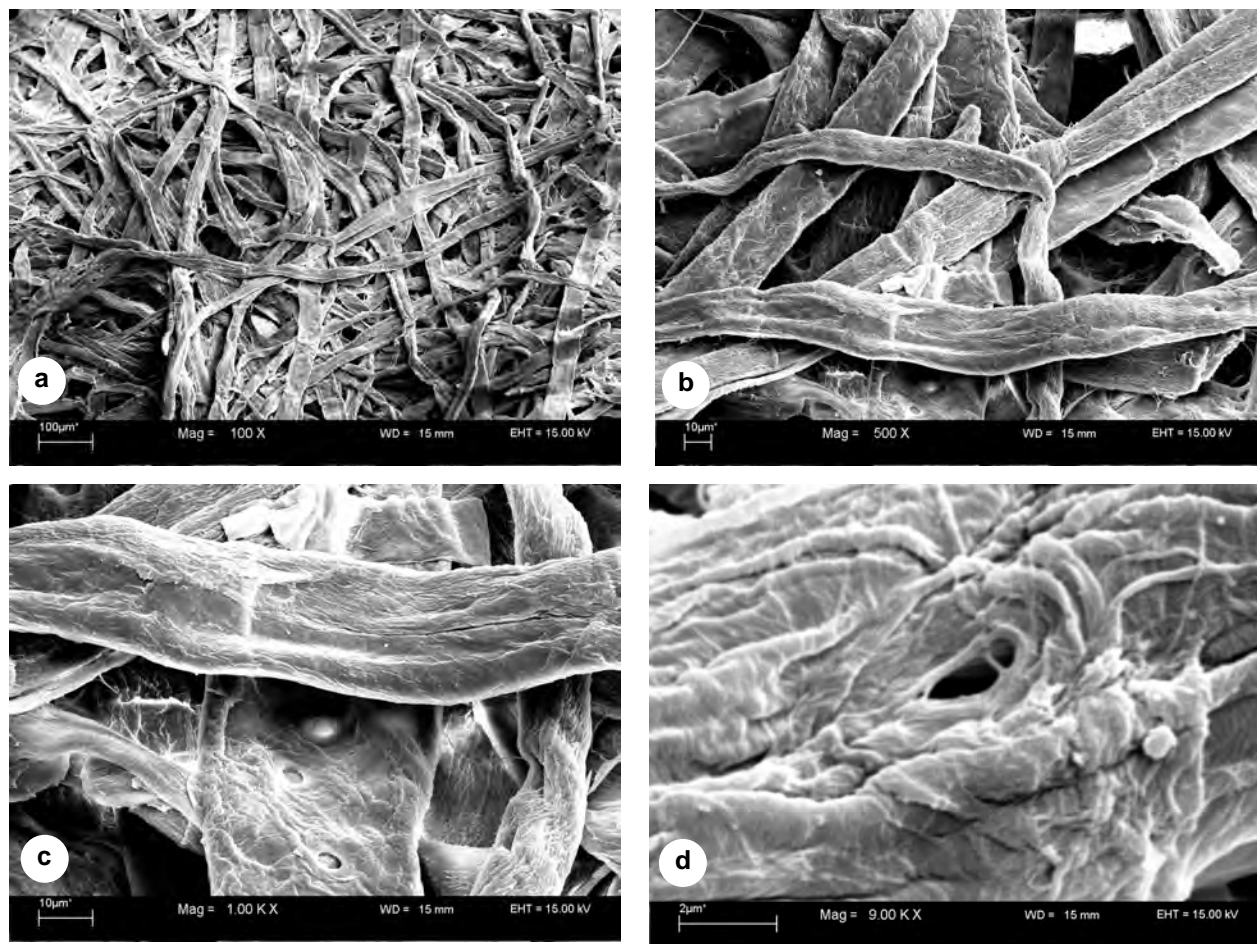


Abb. A28: Filterpapier (Vergrößerung: a 100x; b 500x; c 1000x; d 9000x)

Anhang B: Daten

Modellsystem Weizen und Mehltau: Auswirkungen von Niederschlägen auf den Befall unter Laborbedingungen

Tab. B1: Weizenkontaktwinkel

Weizensorte/Variante	Kontaktwinkel [°]
Kanzler intakt (Ka1)	171; 166; 169; 167; 165; 168; 160; 162; 165; 170; 169; 165; 162; 168; 160;
Kris intakt (Kr1)	170; 167; 165; 168; 163; 169; 170; 165; 168; 162; 171; 169; 164; 165; 166
Ludwig intakt (Lu1)	160; 160; 162; 168; 165; 166; 162; 163; 168; 162; 162; 160; 159; 163; 165
Kanzler abgewischt (Ka0)	114; 124; 109; 110; 102; 112; 110; 113; 117; 111; 98; 101; 107; 106; 112
Kris abgewischt (Kr0)	112; 104; 95; 110; 112; 108; 105; 105; 126; 99; 93; 99; 102; 100; 114
Ludwig abgewischt (Lu0)	112; 111; 111; 117; 107; 104; 108; 109; 110; 93; 102; 102; 101; 108; 98

Tab. B2: Ergebnisse des Standardtests zur Selbstreinigung von Weizen (Kontamination in Prozent pro Fläche)

Wachse intakt

Kanzler	Ka1-1	0	Kris	Kr1-1	0	Ludwig	L1-1	0,02	Referenz	T1-1	24,49
	Ka1-2	0,83		Kr1-2	0		L1-2	0,31		T1-2	34,7
	Ka1-3	0		Kr1-3	0		L1-3	0,72		T1-3	27,05
	Ka1-4	0,83		Kr1-4	0,03		L1-4	0		T1-4	28,59
	Ka1-5	0		Kr1-5	0,02		L1-5	0,26		T1-5	31,13
	Ka1-6	0		Kr1-6	0,04		L1-6	0		T1-6	31,75
	Ka1-7	0,45		Kr1-7	0,08		L1-7	0		T1-7	17,38
	Ka1-8	0,1		Kr1-8	0		L1-8	0,06		T1-8	23,04
	Ka1-9	0,1		Kr1-9	0		L1-9	0,11		T1-9	29,46
	Ka1-10	0		Kr1-10	0		L1-10	0,03		T1-10	37,17
	Ka2-1	0,12		Kr2-1	0,03		L2-1	0,09		T2-1	21,35
	Ka2-2	0,26		Kr2-2	0,12		L2-2	0		T2-2	25,98
	Ka2-3	0,05		Kr2-3	0,04		L2-3	0,02		T2-3	23,52
	Ka2-4	0,1		Kr2-4	0		L2-4	0		T2-4	26,35
	Ka2-5	0,22		Kr2-5	0		L2-5	0,06		T2-5	20,88
	Ka2-6	0,05		Kr2-6	0,16		L2-6	0,16		T2-6	27,16
	Ka2-7	0		Kr2-7	0,07		L2-7	0,3		T2-7	23,97
	Ka2-8	0		Kr2-8	0,1		L2-8	0,18		T2-8	25,19
	Ka2-9	0,11		Kr2-9	0,2		L2-9	0,06		T2-9	25,78
	Ka2-10	0,31		Kr2-10	0,08		L2-10	0,26		T2-10	18,86
	Ka3-1	0,06		Kr3-1	0		L3-1	0,43		T3-1	21,44
	Ka3-2	0,04		Kr3-2	0		L3-2	0		T3-2	21,37
	Ka3-3	0		Kr3-3	0		L3-3	0,72		T3-3	25,29
	Ka3-4	0,02		Kr3-4	0		L3-4	1,04		T3-4	19,94
	Ka3-5	0,1		Kr3-5	0,04		L3-5	0,51		T3-5	30,87
	Ka3-6	0,33		Kr3-6	0,09		L3-6	0,02		T3-6	19,4
	Ka3-7	0		Kr3-7	0,54		L3-7	2,18		T3-7	19,59
	Ka3-8	0,09		Kr3-8	0,03		L3-8	0,44		T3-8	20,98
	Ka3-9	0,57		Kr3-9	0		L3-9	0,02		T3-9	23,83
	Ka3-10	0		Kr3-10	0,01		L3-10	0,09		T3-10	23,43
	Ka4-1	0		Kr4-1	0,14		L4-1	0,07		T4-1	26,06
	Ka4-2	0,08		Kr4-2	0,08		L4-2	0		T4-2	24,08
	Ka4-3	0		Kr4-3	0,34		L4-3	0,13		T4-3	38,07
	Ka4-4	0,04		Kr4-4	0,2		L4-4	0,32		T4-4	22,17
	Ka4-5	0,13		Kr4-5	0,41		L4-5	0		T4-5	27,34
	Ka4-6	0,01		Kr4-6	0,05		L4-6	0,39		T4-6	26,23
	Ka4-7	0,12		Kr4-7	0		L4-7	0		T4-7	25,62

	Ka4-8	0		Kr4-8	0		L4-8	0,18		T4-8	24,69
	Ka4-9	0		Kr4-9	0		L4-9	0		T4-9	32,97
	Ka4-10	0		Kr4-10	0,02		L4-10	0,2		T4-10	26,07
	Ka5-1	0,83		Kr5-1	0,02		L5-1	0,01			
	Ka5-2	0,01		Kr5-2	0		L5-2	0			
	Ka5-3	0,08		Kr5-3	0,48		L5-3	0,09			
	Ka5-4	0,7		Kr5-4	0,13		L5-4	0			
	Ka5-5	0,82		Kr5-5	0		L5-5	0,1			
	Ka5-6	0		Kr5-6	0,45		L5-6	0,02			
	Ka5-7	0,16		Kr5-7	0		L5-7	0,17			
	Ka5-8	0		Kr5-8	0,01		L5-8	0,41			
	Ka5-9	1,69		Kr5-9	0		L5-9	0,91			
	Ka5-10	0,18		Kr5-10	0,04		L5-10	0			

Wachse zerstört

Kanzler			Kris			Ludwig			Referenz		
	Ka1-1	2,1		Kr1-1	1,43		L1-1	3,89		T1-1	26,33
	Ka1-2	0,87		Kr1-2	1,95		L1-2	3,97		T1-2	28,53
	Ka1-3	0,27		Kr1-3	0,78		L1-3	1,56		T1-3	23,28
	Ka1-4	0,78		Kr1-4	1,63		L1-4	1,31		T1-4	19,86
	Ka1-5	1,84		Kr1-5	1,06		L1-5	3,8		T1-5	28,63
	Ka1-6	2,19		Kr1-6	0,67		L1-6	2,57		T1-6	29,12
	Ka1-7	2,08		Kr1-7	5,09		L1-7	3,55		T1-7	23,63
	Ka1-8	3,33		Kr1-8	3,78		L1-8	2,93		T1-8	19,23
	Ka1-9	2,13		Kr1-9	2,62		L1-9	1,54		T1-9	23,42
	Ka1-10	0,89		Kr1-10	3,2		L1-10	2,21		T1-10	26,53
	Ka2-1	4,7		Kr2-1	0,57		L2-1	1,39		T2-1	23,12
	Ka2-2	1,7		Kr2-2	2,31		L2-2	0,98		T2-2	28,09
	Ka2-3	2,86		Kr2-3	4,68		L2-3	1,4		T2-3	19,01
	Ka2-4	4,92		Kr2-4	1,46		L2-4	1,19		T2-4	23,64
	Ka2-5	1,49		Kr2-5	4,76		L2-5	1,82		T2-5	22,03
	Ka2-6	3,52		Kr2-6	4,65		L2-6	0,94		T2-6	32,89
	Ka2-7	5,56		Kr2-7	2,94		L2-7	3,8		T2-7	25,62
	Ka2-8	2,4		Kr2-8	1,49		L2-8	1,65		T2-8	30,01
	Ka2-9	1,13		Kr2-9	3,85		L2-9	2,09		T2-9	26,84
	Ka2-10	8,92		Kr2-10	2,99		L2-10	5,05		T2-10	24,37
	Ka3-1	5,58		Kr3-1	2		L3-1	1,13		T3-1	26,54
	Ka3-2	2,98		Kr3-2	0,36		L3-2	3,66		T3-2	22,13
	Ka3-3	1,45		Kr3-3	3,36		L3-3	2,12		T3-3	19,65
	Ka3-4	2,89		Kr3-4	1,03		L3-4	3,65		T3-4	23,65
	Ka3-5	5,64		Kr3-5	1,7		L3-5	0,97		T3-5	31,67
	Ka3-6	1,45		Kr3-6	0,13		L3-6	6,14		T3-6	20,65
	Ka3-7	3,9		Kr3-7	1,48		L3-7	4,21		T3-7	22,85
	Ka3-8	1,76		Kr3-8	3,86		L3-8	6,29		T3-8	23,83
	Ka3-9	1,61		Kr3-9	4,28		L3-9	3,02		T3-9	20,69
	Ka3-10	3,96		Kr3-10	4,21		L3-10	1,21		T3-10	25,23
	Ka4-1	5,86		Kr4-1	1,66		L4-1	3,44		T4-1	23,12
	Ka4-2	2,03		Kr4-2	2,79		L4-2	0,98		T4-2	28,65
	Ka4-3	0,79		Kr4-3	5,66		L4-3	3,05		T4-3	20,03
	Ka4-4	4,13		Kr4-4	4,82		L4-4	3,85		T4-4	24,96
	Ka4-5	3,94		Kr4-5	1,67		L4-5	3,83		T4-5	19,36
	Ka4-6	3,59		Kr4-6	2,3		L4-6	3,38		T4-6	20,06
	Ka4-7	1,49		Kr4-7	1,99		L4-7	2,55		T4-7	24,2
	Ka4-8	2,62		Kr4-8	1,74		L4-8	0,55		T4-8	21,36
	Ka4-9	3,35		Kr4-9	3,54		L4-9	2,14		T4-9	29,63
	Ka4-10	8,44		Kr4-10	3,44		L4-10	0,49		T4-10	21,36
	Ka5-1	1,52		Kr5-1	2,27		L5-1	3,41			
	Ka5-2	0,82		Kr5-2	2,28		L5-2	1,45			
	Ka5-3	1,75		Kr5-3	0,74		L5-3	0,85			

	Ka5-4	3,08		Kr5-4	1,72		L5-4	6,44
	Ka5-5	0,73		Kr5-5	0,66		L5-5	4,06
	Ka5-6	4,21		Kr5-6	1,28		L5-6	1,8
	Ka5-7	3,43		Kr5-7	1,26		L5-7	2,07
	Ka5-8	1,7		Kr5-8	3,09		L5-8	2
	Ka5-9	0,86		Kr5-9	1,11		L5-9	1,29
	Ka5-10	5,03		Kr5-10	2,84		L5-10	5,31

Tab. B3: Anzahl der verbliebenen Konidien nach Beneblung (1h nach Inokulation)

Wachse intakt

Referenz	Fläche [µm²]	Konidien	Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
3R-1-1	328380	110	3Ka-1-1	327996	20	16	3Kr-1-1	327996	4	3
3R-1-2	327227	78	3Ka-1-2	327996	20	9	3Kr-1-2	327996	2	2
3R-1-3	327227	129	3Ka-1-3	327996	3	3	3Kr-1-3	327996	3	2
3R-1-4	327227	119	3Ka-1-4	327996	10	9	3Kr-1-4	327996	3	3
3R-1-5	327064	94	3Ka-1-5	327996	8	6	3Kr-1-5	327996	3	1
3R-1-6	327064	78	3Ka-1-6	327996	6	2	3Kr-1-6	327996	1	1
3R-1-7	327064	132	3Ka-1-7	327996	9	6	3Kr-1-7	327996	0	0
3R-1-8	327064	113	3Ka-1-8	329803	4	1	3Kr-1-8	327996	2	2
3R-1-9	327064	183	3Ka-1-9	329803	9	8	3Kr-1-9	327996	0	0
3R-1-10	327064	109	3Ka-1-10	329803	13	6	3Kr-1-10	327996	2	2
3R-2-1	327633	136	3Ka-2-1	327633	14	4	3Kr-2-1	327736	1	0
3R-2-2	327633	91	3Ka-2-2	327633	10	4	3Kr-2-2	327736	0	0
3R-2-3	327633	131	3Ka-2-3	327633	15	11	3Kr-2-3	327736	0	0
3R-2-4	327633	106	3Ka-2-4	327633	20	12	3Kr-2-4	327736	1	0
3R-2-5	327633	120	3Ka-2-5	327633	12	8	3Kr-2-5	327736	1	1
3R-2-6	327633	107	3Ka-2-6	327633	12	8	3Kr-2-6	327736	1	1
3R-2-7	327633	107	3Ka-2-7	327633	12	8	3Kr-2-7	327736	1	1
3R-2-8	327633	88	3Ka-2-8	327633	4	3	3Kr-2-8	327736	5	5
3R-2-9	327633	151	3Ka-2-9	327633	14	9	3Kr-2-9	327736	0	0
3R-2-10	327633	117	3Ka-2-10	327633	11	6	3Kr-2-10	327736	0	0
3R-3-1	327370	171	3Ka-3-1	329803	14	7	3Kr-3-1	327736	1	1
3R-3-2	326172	175	3Ka-3-2	329803	15	8	3Kr-3-2	327736	0	0
3R-3-3	327763	162	3Ka-3-3	329803	9	4	3Kr-3-3	327736	1	1
3R-3-4	327763	201	3Ka-3-4	329803	1	1	3Kr-3-4	327736	2	2
3R-3-5	327763	149	3Ka-3-5	329803	3	3	3Kr-3-5	327736	1	1
3R-3-6	327227	196	3Ka-3-6	329803	6	4	3Kr-3-6	327736	2	1
3R-3-7	327227	184	3Ka-3-7	329803	2	1	3Kr-3-7	327736	1	1
3R-3-8	327227	188	3Ka-3-8	329803	5	2	3Kr-3-8	327736	0	0
3R-3-9	324967	158	3Ka-3-9	329803	12	6	3Kr-3-9	327736	1	1
3R-3-10	327227	172	3Ka-3-10	329803	3	2	3Kr-3-10	327736	0	0
3R-4-1	327996	126	3Ka-4-1	327632	6	5	3Kr-4-1	327996	3	3
3R-4-2	327996	140	3Ka-4-2	327632	20	11	3Kr-4-2	327996	3	3
3R-4-3	327996	122	3Ka-4-3	327632	7	6	3Kr-4-3	327996	1	0
3R-4-4	327995	148	3Ka-4-4	327633	11	11	3Kr-4-4	327996	1	1
3R-4-5	327996	122	3Ka-4-5	327633	5	3	3Kr-4-5	327996	1	1
3R-4-6	327996	118	3Ka-4-6	327633	8	7	3Kr-4-6	327996	5	5
3R-4-7	327996	109	3Ka-4-7	327633	12	6	3Kr-4-7	327996	3	0
3R-4-8	327996	177	3Ka-4-8	327633	2	1	3Kr-4-8	327996	3	2
3R-4-9	327996	122	3Ka-4-9	327633	11	5	3Kr-4-9	327996	2	2
3R-4-10	327996	142	3Ka-4-10	327633	11	8	3Kr-4-10	327996	5	5

Fortsetzung Tab. B3:

Wachse intakt

Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
3L-1-1	327633	3	3
3L-1-2	327633	4	4
3L-1-3	327633	18	5
3L-1-4	327633	6	5
3L-1-5	327633	5	5
3L-1-6	327633	21	15
3L-1-7	327633	4	4
3L-1-8	327633	8	8
3L-1-9	327633	13	7
3L-1-10	327633	1	1
3L-2-1	327736	6	4
3L-2-2	327736	5	5
3L-2-3	327736	7	6
3L-2-4	327736	6	6
3L-2-5	327736	2	2
3L-2-6	327736	4	3
3L-2-7	327736	3	1
3L-2-8	327736	1	1
3L-2-9	327736	2	2
3L-2-10	327736	3	3
3L-3-1	327996	14	10
3L-3-2	327996	6	6
3L-3-3	327996	6	6
3L-3-4	327996	1	1
3L-3-5	327996	6	4
3L-3-6	327996	2	2
3L-3-7	327996	1	1
3L-3-8	327996	4	4
3L-3-9	327996	5	5
3L-3-10	327996	2	2
3L-4-1	327736	2	2
3L-4-2	327736	5	3
3L-4-3	327736	4	3
3L-4-4	327736	11	6
3L-4-5	327736	3	3
3L-4-6	327736	3	3
3L-4-7	327736	3	2
3L-4-8	327736	1	1
3L-4-9	327736	14	4
3L-4-10	327736	3	3

Fortsetzung Tab. B3:

Wachse zerstört

Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
3Ka-5-1	327737	159	15	3Kr-5-1	327736	173	12	3L-5-1	327996	152	14
3Ka-5-2	327737	245	23	3Kr-5-2	327736	126	12	3L-5-2	327996	171	17
3Ka-5-3	327737	261	25	3Kr-5-3	327736	98	18	3L-5-3	327996	170	14
3Ka-5-4	327737	155	13	3Kr-5-4	327736	106	15	3L-5-4	327996	182	13
3Ka-5-5	327737	137	10	3Kr-5-5	327736	97	12	3L-5-5	327996	181	30
3Ka-5-6	327737	162	17	3Kr-5-6	327736	190	14	3L-5-6	327996	124	12
3Ka-5-7	327737	131	18	3Kr-5-7	327736	122	10	3L-5-7	327996	167	7
3Ka-5-8	327737	154	25	3Kr-5-8	327736	146	13	3L-5-8	327996	165	22

3Ka-5-9	327736	149	22	3Kr-5-9	327736	137	11	3L-5-9	327996	173	14
3Ka-5-10	327737	165	20	3Kr-5-10	327736	134	7	3L-5-10	327996	236	14
3Ka-6-1	327996	170	15	3Kr-6-1	327996	133	14	3L-6-1	327987	176	20
3Ka-6-2	327996	97	9	3Kr-6-2	327996	121	10	3L-6-2	327987	255	23
3Ka-6-3	327996	122	14	3Kr-6-3	327996	139	12	3L-6-3	327987	211	24
3Ka-6-4	327996	118	17	3Kr-6-4	327996	152	22	3L-6-4	327987	144	16
3Ka-6-5	327996	185	20	3Kr-6-5	327996	231	21	3L-6-5	327987	152	20
3Ka-6-6	327996	166	21	3Kr-6-6	327996	129	14	3L-6-6	327987	244	20
3Ka-6-7	327996	110	15	3Kr-6-7	327996	239	19	3L-6-7	327987	139	13
3Ka-6-8	327996	130	15	3Kr-6-8	327996	140	18	3L-6-8	327987	129	20
3Ka-6-9	327996	165	11	3Kr-6-9	327996	138	19	3L-6-9	327987	202	25
3Ka-6-10	327996	80	11	3Kr-6-10	327996	104	13	3L-6-10	327987	138	5
3Ka-7-1	327996	119	13	3Kr-7-1	327633	180	22	3L-7-1	327996	212	28
3Ka-7-2	327996	154	9	3Kr-7-2	327633	194	27	3L-7-2	327996	111	7
3Ka-7-3	327996	87	12	3Kr-7-3	327633	194	18	3L-7-3	327996	139	30
3Ka-7-4	327996	125	8	3Kr-7-4	327633	145	16	3L-7-4	327996	167	25
3Ka-7-5	327996	87	17	3Kr-7-5	327987	182	13	3L-7-5	327996	79	14
3Ka-7-6	327996	129	12	3Kr-7-6	327987	208	30	3L-7-6	327996	104	24
3Ka-7-7	327996	63	12	3Kr-7-7	327987	184	24	3L-7-7	327996	101	16
3Ka-7-8	327996	109	7	3Kr-7-8	327987	115	14	3L-7-8	327996	118	24
3Ka-7-9	327996	110	11	3Kr-7-9	327987	181	24	3L-7-9	327996	217	21
3Ka-7-10	327996	77	10	3Kr-7-10	327987	103	18	3L-7-10	327996	117	19
3Ka-8-1	327736	194	15	3Kr-8-1	328453	105	3	3L-8-1	327633	191	20
3Ka-8-2	327736	153	21	3Kr-8-2	328453	200	16	3L-8-2	327633	113	10
3Ka-8-3	327736	177	16	3Kr-8-3	328453	141	16	3L-8-3	327633	139	15
3Ka-8-4	327736	186	14	3Kr-8-4	327020	197	13	3L-8-4	327633	221	13
3Ka-8-5	327736	162	21	3Kr-8-5	327020	139	10	3L-8-5	327633	175	33
3Ka-8-6	327736	202	22	3Kr-8-6	327020	164	14	3L-8-6	327632	108	18
3Ka-8-7	327736	127	12	3Kr-8-7	327020	167	3	3L-8-7	327632	157	17
3Ka-8-8	327736	157	11	3Kr-8-8	327020	104	3	3L-8-8	327632	119	17
3Ka-8-9	327736	280	21	3Kr-8-9	327020	175	6	3L-8-9	327632	150	23
3Ka-8-10	327736	144	12	3Kr-8-10	327020	202	28	3L-8-10	327632	128	13

Tab. B4: Anzahl der verbliebenen Konidien nach Beneblung (2h nach Inokulation)

Wachse intakt

Referenz	Fläche [µm²]	Konidien	Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
RL1-1	326672	115	Ka1-1	326672	9	5	Kr1-1	326903	18	8
RL1-2	326672	102	Ka1-2	326672	12	9	Kr1-2	326055	20	6
RL1-3	326672	120	Ka1-3	326672	7	2	Kr1-3	326327	6	4
RL1-4	326672	86	Ka1-4	326508	14	6	Kr1-4	326327	10	3
RL1-5	326672	129	Ka1-5	326327	14	7	Kr1-5	326327	17	12
RL1-6	326160	114	Ka1-6	326326	7	5	Kr1-6	326327	18	9
RL1-7	326160	129	Ka1-7	326327	10	6	Kr1-7	326160	14	10
RL1-8	326326	91	Ka1-8	326327	8	4	Kr1-8	326160	21	12
RL1-9	326326	192	Ka1-9	326327	8	3	Kr1-9	326672	13	4
RL1-10	326326	123	Ka1-10	326327	10	8	Kr1-10	326672	8	4
RL2-1	326749	107	Ka2-1	326749	25	6	Kr2-1	326322	5	2
RL2-2	326749	118	Ka2-2	326749	14	4	Kr2-2	326322	10	4
RL2-3	326749	116	Ka2-3	326749	16	12	Kr2-3	326322	4	2
RL2-4	326559	98	Ka2-4	326749	17	7	Kr2-4	326322	11	3
RL2-5	326559	114	Ka2-5	326749	9	4	Kr2-5	326322	5	1
RL2-6	326559	106	Ka2-6	326749	6	3	Kr2-6	326322	12	6
RL2-7	326559	92	Ka2-7	327248	15	4	Kr2-7	326322	16	5
RL2-8	326559	104	Ka2-8	325362	10	6	Kr2-8	326322	18	5
RL2-9	326559	122	Ka2-9	326055	13	10	Kr2-9	326322	13	5
RL2-10	326559	119	Ka2-10	326055	21	13	Kr2-10	326322	9	4
RL3-1	326359	113	Ka3-1	326056	1	0	Kr3-1	326701	7	6

RL3-2	327204	98	Ka3-2	326508	5	3	Kr3-2	326701	11	9
RL3-3	326672	97	Ka3-3	326508	8	5	Kr3-3	326701	9	3
RL3-4	326672	128	Ka3-4	326327	2	1	Kr3-4	326557	4	1
RL3-5	326508	85	Ka3-5	326160	4	2	Kr3-5	326557	10	5
RL3-6	326508	110	Ka3-6	326160	2	1	Kr3-6	326557	8	3
RL3-7	326672	68	Ka3-7	326160	5	2	Kr3-7	326557	10	5
RL3-8	326160	101	Ka3-8	326672	11	5	Kr3-8	326212	15	6
RL3-9	326672	121	Ka3-9	326508	4	2	Kr3-9	326212	2	1
RL3-10	326672	100	Ka3-10	326508	11	2	Kr3-10	326212	9	5
RL4-1	326672	61	Ka4-1	326476	17	9	Kr4-1	326701	10	5
RL4-2	326508	51	Ka4-2	326476	11	4	Kr4-2	326701	13	6
RL4-3	326508	53	Ka4-3	326476	17	7	Kr4-3	326701	8	3
RL4-4	326508	40	Ka4-4	328747	9	5	Kr4-4	326322	9	4
RL4-5	326508	46	Ka4-5	328747	14	8	Kr4-5	326322	17	9
RL4-6	326508	86	Ka4-6	326476	14	5	Kr4-6	326132	10	4
RL4-7	326508	42	Ka4-7	326476	13	5	Kr4-7	326132	12	5
RL4-8	326508	48	Ka4-8	326476	12	7	Kr4-8	326669	10	4
RL4-9	326508	48	Ka4-9	326476	10	2	Kr4-9	326476	13	4
RL4-10	326508	50	Ka4-10	326476	8	3	Kr4-10	326476	12	5

Fortsetzung Tab. B4:

Wachse intakt

Ludwig	Fläche [µm ²]	Konidien	gekeimt
L1-1	326160	7	3
L1-2	326160	5	3
L1-3	326160	15	10
L1-4	326672	13	4
L1-5	326672	10	5
L1-6	326672	14	6
L1-7	326672	13	3
L1-8	326508	7	3
L1-9	326508	7	6
L1-10	326508	7	5
L2-1	326160	7	3
L2-2	326160	6	4
L2-3	326160	15	11
L2-4	326672	13	4
L2-5	326672	10	6
L2-6	326672	14	7
L2-7	326672	12	5
L2-8	326508	7	3
L2-9	326508	8	7
L2-10	326508	7	5
L3-1	326669	14	6
L3-2	326669	14	14
L3-3	326669	8	5
L3-4	326669	13	11
L3-5	326669	11	8
L3-6	327361	8	4
L3-7	326322	7	5
L3-8	326322	11	7
L3-9	326820	20	6
L3-10	326132	14	5
L4-1	326902	19	9
L4-2	326902	23	9
L4-3	326902	14	5
L4-4	326701	18	8

L4-5	326371	17	9
L4-6	327901	39	12
L4-7	326371	18	9
L4-8	326371	26	3
L4-9	326717	96	10
L4-10	326717	19	5

Fortsetzung Tab. B4:

Wachse zerstört

Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
Ka5-1	326322	102	9	Kr5-1	326557	248	19	L5-1	326476	128	8
Ka5-2	326322	180	17	Kr5-2	326557	411	46	L5-2	326525	82	9
Ka5-3	326322	94	12	Kr5-3	326358	207	16	L5-3	326525	145	14
Ka5-4	326322	106	11	Kr5-4	326358	83	12	L5-4	326025	52	4
Ka5-5	326358	126	3	Kr5-5	326358	239	18	L5-5	326025	72	5
Ka5-6	326902	99	10	Kr5-6	326557	122	9	L5-6	326525	132	9
Ka5-7	326701	157	6	Kr5-7	326557	124	14	L5-7	326525	115	7
Ka5-8	326701	87	8	Kr5-8	326358	148	10	L5-8	326525	97	17
Ka5-9	326701	172	15	Kr5-9	326358	131	23	L5-9	326525	80	7
Ka5-10	326701	87	10	Kr5-10	326358	197	21	L5-10	326525	96	10
Ka6-1	326856	117	5	Kr6-1	326902	133	15	L6-1	326508	101	10
Ka6-2	326856	113	8	Kr6-2	326902	101	6	L6-2	326508	126	5
Ka6-3	326903	112	8	Kr6-3	326015	88	5	L6-3	326055	82	4
Ka6-4	326749	99	3	Kr6-4	326015	63	6	L6-4	326055	102	6
Ka6-5	327248	117	9	Kr6-5	327044	157	13	L6-5	326055	96	6
Ka6-6	326903	107	9	Kr6-6	326701	70	8	L6-6	326559	65	6
Ka6-7	326749	119	11	Kr6-7	326557	92	6	L6-7	326559	120	10
Ka6-8	326559	159	9	Kr6-8	326557	91	13	L6-8	326402	160	9
Ka6-9	326559	136	4	Kr6-9	326557	93	12	L6-9	326903	143	14
Ka6-10	326559	179	9	Kr6-10	326557	112	14	L6-10	326903	136	4
Ka7-1	326326	73	8	Kr7-1	326701	156	6	L7-1	326668	80	11
Ka7-2	326326	64	7	Kr7-2	326701	86	7	L7-2	326668	99	11
Ka7-3	326856	105	5	Kr7-3	326476	67	9	L7-3	326668	54	4
Ka7-4	326856	116	9	Kr7-4	326476	84	8	L7-4	326668	77	3
Ka7-5	326856	73	8	Kr7-5	326476	40	4	L7-5	326668	103	4
Ka7-6	326856	68	7	Kr7-6	326476	102	5	L7-6	326476	109	12
Ka7-7	326856	68	4	Kr7-7	326476	66	6	L7-7	326476	124	10
Ka7-8	326856	94	7	Kr7-8	326476	60	9	L7-8	326476	105	9
Ka7-9	326856	97	5	Kr7-9	326476	102	6	L7-9	326476	76	6
Ka7-10	326856	89	8	Kr7-10	326476	66	4	L7-10	326476	117	10
Ka8-1	326327	96	9	Kr8-1	326327	105	11	L8-1	326476	128	13
Ka8-2	326327	111	9	Kr8-2	326327	95	6	L8-2	326476	204	18
Ka8-3	326327	129	7	Kr8-3	326856	168	13	L8-3	326476	103	14
Ka8-4	326508	163	10	Kr8-4	326672	116	9	L8-4	326903	139	8
Ka8-5	327363	157	8	Kr8-5	326672	80	0	L8-5	326903	80	9
Ka8-6	326508	84	8	Kr8-6	326856	120	7	L8-6	326903	111	7
Ka8-7	327018	133	8	Kr8-7	326672	134	6	L8-7	326903	132	12
Ka8-8	326160	110	10	Kr8-8	326856	104	9	L8-8	326701	117	10
Ka8-9	326160	125	9	Kr8-9	326856	98	13	L8-9	326701	155	10
Ka8-10	326160	114	10	Kr8-10	326856	107	18	L8-10	326701	58	7

Tab. B5: Anzahl der verbliebenen Konidien nach Beneblung (3h nach Inokulation)

Wachse intakt

Referenz	Fläche [µm²]	Konidien	Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
4R-1-1	327192	194	4Ka-1-1	327192	17	16	4Kr-1-1	327064	6	6
4R-1-2	327192	126	4Ka-1-2	327192	14	13	4Kr-1-2	327064	15	14
4R-1-3	327192	148	4Ka-1-3	327192	12	12	4Kr-1-3	327064	20	12
4R-1-4	327192	124	4Ka-1-4	327192	16	12	4Kr-1-4	327064	14	13
4R-1-5	327192	121	4Ka-1-5	327192	20	18	4Kr-1-5	327064	24	7
4R-1-6	327192	134	4Ka-1-6	327192	24	16	4Kr-1-6	327064	22	19
4R-1-7	327192	128	4Ka-1-7	327192	13	13	4Kr-1-7	327064	18	15
4R-1-8	327192	83	4Ka-1-8	327192	17	14	4Kr-1-8	327064	11	11
4R-1-9	327192	114	4Ka-1-9	327192	9	8	4Kr-1-9	327064	14	14
4R-1-10	327192	93	4Ka-1-10	327192	13	7	4Kr-1-10	327064	15	10
4R-2-1	327192	101	4Ka-2-1	327192	6	6	4Kr-2-1	327192	10	10
4R-2-2	327192	126	4Ka-2-2	327192	9	9	4Kr-2-2	327192	6	6
4R-2-3	327192	114	4Ka-2-3	327192	13	11	4Kr-2-3	327192	11	10
4R-2-4	327192	127	4Ka-2-4	327192	15	13	4Kr-2-4	327192	12	11
4R-2-5	327192	97	4Ka-2-5	327192	9	9	4Kr-2-5	327192	14	11
4R-2-6	327192	87	4Ka-2-6	327192	10	10	4Kr-2-6	327192	13	11
4R-2-7	327192	138	4Ka-2-7	327192	7	5	4Kr-2-7	327192	18	13
4R-2-8	327192	97	4Ka-2-8	327192	16	16	4Kr-2-8	327192	18	13
4R-2-9	327192	114	4Ka-2-9	327192	8	6	4Kr-2-9	327192	22	17
4R-2-10	327192	103	4Ka-2-10	327192	11	11	4Kr-2-10	327192	32	9
4R-3-1	327192	57	4Ka-3-1	327192	8	5	4Kr-3-1	327192	24	16
4R-3-2	327192	65	4Ka-3-2	327192	21	16	4Kr-3-2	327192	21	15
4R-3-3	327192	127	4Ka-3-3	327192	13	10	4Kr-3-3	327192	19	17
4R-3-4	327192	79	4Ka-3-4	327192	31	22	4Kr-3-4	327192	10	8
4R-3-5	327192	104	4Ka-3-5	327192	18	15	4Kr-3-5	327192	15	12
4R-3-6	327192	73	4Ka-3-6	327192	17	13	4Kr-3-6	327192	16	15
4R-3-7	327192	93	4Ka-3-7	327192	11	11	4Kr-3-7	327192	16	13
4R-3-8	327192	124	4Ka-3-8	327192	15	14	4Kr-3-8	327192	20	15
4R-3-9	327192	70	4Ka-3-9	327192	23	17	4Kr-3-9	327192	24	20
4R-3-10	327192	78	4Ka-3-10	327192	9	8	4Kr-3-10	327192	18	17
4R-4-1	327192	86	4Ka-4-1	327486	12	9	4Kr-4-1	327192	12	10
4R-4-2	327192	118	4Ka-4-2	327486	14	12	4Kr-4-2	327192	6	5
4R-4-3	327192	63	4Ka-4-3	327486	9	9	4Kr-4-3	327192	16	12
4R-4-4	327192	106	4Ka-4-4	327486	9	7	4Kr-4-4	327192	9	8
4R-4-5	327192	102	4Ka-4-5	327486	7	6	4Kr-4-5	327192	24	22
4R-4-6	327192	92	4Ka-4-6	327486	8	7	4Kr-4-6	327192	13	12
4R-4-7	327192	94	4Ka-4-7	327486	16	14	4Kr-4-7	327192	8	6
4R-4-8	327192	93	4Ka-4-8	327486	19	15	4Kr-4-8	327192	14	13
4R-4-9	327192	55	4Ka-4-9	327486	16	13	4Kr-4-9	327192	10	10
4R-4-10	327192	127	4Ka-4-10	327486	12	10	4Kr-4-10	327192	12	11

Fortsetzung Tab. B5:

Wachse intakt

Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
4L-1-1	327164	7	4
4L-1-2	327064	12	11
4L-1-3	327064	6	6
4L-1-4	327064	8	7
4L-1-5	327064	10	9
4L-1-6	327064	6	5
4L-1-7	327064	8	6
4L-1-8	327064	11	11

4L-1-9	327064	18	12
4L-1-10	327064	7	7
4L-2-1	327486	9	8
4L-2-2	327486	13	7
4L-2-3	327486	7	6
4L-2-4	327486	11	10
4L-2-5	327486	12	12
4L-2-6	327486	5	4
4L-2-7	327486	8	8
4L-2-8	327486	8	8
4L-2-9	327486	11	10
4L-2-10	327486	10	10
4L-3-1	327486	9	7
4L-3-2	327486	8	7
4L-3-3	327486	15	15
4L-3-4	327486	15	13
4L-3-5	327486	23	18
4L-3-6	327486	16	10
4L-3-7	327486	18	15
4L-3-8	327486	12	12
4L-3-9	327486	13	11
4L-3-10	327486	19	17
4L-4-1	327192	7	7
4L-4-2	327192	20	11
4L-4-3	327192	15	15
4L-4-4	327192	17	17
4L-4-5	327192	13	10
4L-4-6	327192	8	4
4L-4-7	327192	16	15
4L-4-8	327192	19	16
4L-4-9	327192	19	16
4L-4-10	327192	18	15

Fortsetzung Tab. B5:

Wachse zerstört

Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
4Ka-5-1	327486	135	5	4Kr-5-1	327192	224	16	4L-5-1	327192	138	12
4Ka-5-2	327486	152	6	4Kr-5-2	327192	135	6	4L-5-2	327192	124	13
4Ka-5-3	327486	186	5	4Kr-5-3	327192	257	7	4L-5-3	327192	118	14
4Ka-5-4	327486	137	9	4Kr-5-4	327192	140	10	4L-5-4	327192	134	10
4Ka-5-5	327486	197	12	4Kr-5-5	327192	107	7	4L-5-5	327192	131	6
4Ka-5-6	327486	147	12	4Kr-5-6	327192	166	9	4L-5-6	327192	115	12
4Ka-5-7	327486	157	9	4Kr-5-7	327192	158	12	4L-5-7	327192	177	14
4Ka-5-8	327486	149	11	4Kr-5-8	327192	141	7	4L-5-8	327192	124	6
4Ka-5-9	327486	109	4	4Kr-5-9	327192	196	8	4L-5-9	327192	111	6
4Ka-5-10	327486	159	13	4Kr-5-10	327192	110	4	4L-5-10	327192	78	9
4Ka-6-1	327192	229	16	4Kr-6-1	327486	126	11	4L-6-1	327192	80	6
4Ka-6-2	327192	98	4	4Kr-6-2	327486	95	6	4L-6-2	327192	77	5
4Ka-6-3	327192	79	3	4Kr-6-3	327486	135	2	4L-6-3	327192	109	13
4Ka-6-4	327192	116	5	4Kr-6-4	327486	136	10	4L-6-4	327192	137	17
4Ka-6-5	327192	138	11	4Kr-6-5	327486	100	5	4L-6-5	327192	135	7
4Ka-6-6	327192	144	4	4Kr-6-6	327486	93	8	4L-6-6	327192	104	10
4Ka-6-7	327192	63	9	4Kr-6-7	327486	169	10	4L-6-7	327192	138	7
4Ka-6-8	327192	336	8	4Kr-6-8	327486	170	7	4L-6-8	327192	151	8
4Ka-6-9	327192	127	7	4Kr-6-9	327486	109	7	4L-6-9	327192	94	12
4Ka-6-10	327192	126	9	4Kr-6-10	327486	111	8	4L-6-10	327192	129	18
4Ka-7-1	327192	209	8	4Kr-7-1	327192	139	12	4L-7-1	327192	88	8

4Ka-7-2	327192	164	12	4Kr-7-2	327192	94	5	4L-7-2	327192	117	8
4Ka-7-3	327192	200	6	4Kr-7-3	327192	282	11	4L-7-3	327192	44	7
4Ka-7-4	327192	167	14	4Kr-7-4	327192	156	11	4L-7-4	327192	235	17
4Ka-7-5	327192	116	9	4Kr-7-5	327192	220	19	4L-7-5	327192	80	6
4Ka-7-6	327192	191	7	4Kr-7-6	327192	119	9	4L-7-6	327192	149	8
4Ka-7-7	327192	100	5	4Kr-7-7	327192	165	7	4L-7-7	327192	140	18
4Ka-7-8	327192	147	11	4Kr-7-8	327192	161	6	4L-7-8	327192	109	15
4Ka-7-9	327192	224	12	4Kr-7-9	327192	200	13	4L-7-9	327192	125	10
4Ka-7-10	327192	247	14	4Kr-7-10	327192	169	8	4L-7-10	327192	74	12
4Ka-8-1	327192	107	7	4Kr-8-1	327192	111	13	4L-8-1	327486	191	16
4Ka-8-2	327192	277	7	4Kr-8-2	327192	92	5	4L-8-2	327486	157	13
4Ka-8-3	327192	62	8	4Kr-8-3	327192	102	10	4L-8-3	327486	144	19
4Ka-8-4	327192	118	10	4Kr-8-4	327192	95	6	4L-8-4	327486	204	12
4Ka-8-5	327192	93	7	4Kr-8-5	327192	57	5	4L-8-5	327486	139	10
4Ka-8-6	327192	112	5	4Kr-8-6	327192	98	6	4L-8-6	327486	158	12
4Ka-8-7	327192	108	7	4Kr-8-7	327192	115	15	4L-8-7	327486	174	12
4Ka-8-8	327192	73	8	4Kr-8-8	327192	100	3	4L-8-8	327486	262	12
4Ka-8-9	327192	277	8	4Kr-8-9	327192	112	12	4L-8-9	327486	133	10
4Ka-8-10	327192	117	4	4Kr-8-10	327192	118	2	4L-8-10	327486	134	14

Tab. B6: Anzahl der verbliebenen Konidien nach Beregnung (1h nach Inokulation)

Wachse intakt

Referenz	Fläche [µm²]	Konidien	Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
1R-1-1	327441	144	1Ka-1-1	327256	0	0	1Kr-1-1	328828	0	0
1R-1-2	325179	88	1Ka-1-2	329532	0	0	1Kr-1-2	326557	0	0
1R-1-3	327246	75	1Ka-1-3	329532	0	0	1Kr-1-3	328829	0	0
1R-1-4	327246	86	1Ka-1-4	327256	0	0	1Kr-1-4	328828	0	0
1R-1-5	327246	87	1Ka-1-5	327256	0	0	1Kr-1-5	326557	0	0
1R-1-6	327246	101	1Ka-1-6	329532	0	0	1Kr-1-6	326557	0	0
1R-1-7	327246	93	1Ka-1-7	329532	0	0	1Kr-1-7	327935	0	0
1R-1-8	328482	72	1Ka-1-8	327256	0	0	1Kr-1-8	327935	0	0
1R-1-9	328482	100	1Ka-1-9	329533	0	0	1Kr-1-9	327935	0	0
1R-1-10	328482	93	1Ka-1-10	329533	0	0	1Kr-1-10	330216	0	0
1R-2-1	326219	189	1Ka-2-1	327016	0	0	1Kr-2-1	327368	0	0
1R-2-2	326219	152	1Ka-2-2	327016	0	0	1Kr-2-2	329645	0	0
1R-2-3	328488	107	1Ka-2-3	327899	0	0	1Kr-2-3	329645	0	0
1R-2-4	329329	108	1Ka-2-4	327899	2	1	1Kr-2-4	327368	0	0
1R-2-5	327550	144	1Ka-2-5	327899	0	0	1Kr-2-5	327368	0	0
1R-2-6	327550	115	1Ka-2-6	327726	0	0	1Kr-2-6	327368	0	0
1R-2-7	325288	87	1Ka-2-7	328399	0	0	1Kr-2-7	327368	0	0
1R-2-8	327550	118	1Ka-2-8	328399	0	0	1Kr-2-8	329645	0	0
1R-2-9	327550	126	1Ka-2-9	328399	0	0	1Kr-2-9	329645	0	0
1R-2-10	327550	139	1Ka-2-10	328399	0	0	1Kr-2-10	329645	0	0
1R-3-1	327529	96	1Ka-3-1	326379	0	0	1Kr-3-1	327935	0	0
1R-3-2	327529	77	1Ka-3-2	326379	0	0	1Kr-3-2	327935	0	0
1R-3-3	326379	77	1Ka-3-3	326379	2	1	1Kr-3-3	328247	0	0
1R-3-4	326379	109	1Ka-3-4	326379	0	0	1Kr-3-4	328247	0	0
1R-3-5	326379	86	1Ka-3-5	324124	1	0	1Kr-3-5	328247	0	0
1R-3-6	326379	80	1Ka-3-6	326379	0	0	1Kr-3-6	328247	0	0
1R-3-7	324124	79	1Ka-3-7	324124	2	0	1Kr-3-7	326671	0	0
1R-3-8	324124	109	1Ka-3-8	326379	0	0	1Kr-3-8	326671	0	0
1R-3-9	324124	87	1Ka-3-9	324124	2	1	1Kr-3-9	326671	0	0
1R-3-10	324124	144	1Ka-3-10	324124	0	0	1Kr-3-10	326671	0	0
1R-4-1	327256	148	1Ka-4-1	328488	0	0	1Kr-4-1	327528	0	0
1R-4-2	327256	108	1Ka-4-2	326219	1	0	1Kr-4-2	326378	0	0
1R-4-3	327256	108	1Ka-4-3	326219	0	0	1Kr-4-3	328649	1	0
1R-4-4	329532	118	1Ka-4-4	327368	0	0	1Kr-4-4	328649	0	0

1R-4-5	329532	124	1Ka-4-5	329645	0	0	1Kr-4-5	328649	0	0
1R-4-6	329532	167	1Ka-4-6	329645	0	0	1Kr-4-6	326571	0	0
1R-4-7	329532	125	1Ka-4-7	329645	0	0	1Kr-4-7	327066	1	0
1R-4-8	328488	113	1Ka-4-8	329645	0	0	1Kr-4-8	329341	1	0
1R-4-9	328488	154	1Ka-4-9	327368	0	0	1Kr-4-9	327610	0	0
1R-4-10	328488	131	1Ka-4-10	327368	0	0	1Kr-4-10	325347	0	0

Fortsetzung Tab. B6:

Wachse intakt

Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
1L-5-1	327899	0	0
1L-5-2	327899	1	0
1L-5-3	327899	1	0
1L-5-4	325634	0	0
1L-5-5	327016	0	0
1L-5-6	329291	0	0
1L-5-7	327202	0	0
1L-5-8	327016	0	0
1L-5-9	327016	1	0
1L-5-10	329291	0	0
1L-6-1	328246	4	0
1L-6-2	327707	4	0
1L-6-3	326557	1	0
1L-6-4	328828	2	0
1L-6-5	326557	3	0
1L-6-6	326557	1	0
1L-6-7	327441	3	0
1L-6-8	327441	1	0
1L-6-9	325179	1	0
1L-6-10	326557	2	0
1L-7-1	327016	0	0
1L-7-2	329291	0	0
1L-7-3	327899	0	0
1L-7-4	327899	0	0
1L-7-5	327899	5	0
1L-7-6	325634	0	0
1L-7-7	327899	5	0
1L-7-8	325634	0	0
1L-7-9	327899	2	0
1L-7-10	327899	2	0
1L-8-1	326219	1	0
1L-8-2	328488	0	0
1L-8-3	327368	1	0
1L-8-4	329645	0	0
1L-8-5	326219	1	0
1L-8-6	326219	0	0
1L-8-7	326219	0	0
1L-8-8	326219	0	0
1L-8-9	326219	0	0
1L-8-10	326219	0	0

Fortsetzung Tab. B6:

Wachse zerstört

Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
1Ka-5-1	327721	8	0	1Kr-5-1	328399	1	0	1L-5-1	327899	0	0
1Ka-5-2	325458	1	0	1Kr-5-2	330683	1	0	1L-5-2	327899	1	0
1Ka-5-3	327721	2	0	1Kr-5-3	328399	1	0	1L-5-3	327899	1	0
1Ka-5-4	327721	6	0	1Kr-5-4	328399	1	1	1L-5-4	325634	0	0
1Ka-5-5	327873	6	0	1Kr-5-5	328399	1	0	1L-5-5	327016	0	0
1Ka-5-6	327873	2	0	1Kr-5-6	330683	1	0	1L-5-6	329291	0	0
1Ka-5-7	327873	0	0	1Kr-5-7	328399	9	0	1L-5-7	327202	0	0
1Ka-5-8	327873	4	0	1Kr-5-8	328399	1	0	1L-5-8	327016	0	0
1Ka-5-9	327873	0	0	1Kr-5-9	328399	0	0	1L-5-9	327016	1	0
1Ka-5-10	327873	2	0	1Kr-5-10	326131	2	0	1L-5-10	329291	0	0
1Ka-6-1	327411	1	0	1Kr-6-1	327246	0	0	1L-6-1	328246	4	0
1Ka-6-2	327411	0	0	1Kr-6-2	327788	0	0	1L-6-2	327707	4	0
1Ka-6-3	329688	0	0	1Kr-6-3	326902	0	0	1L-6-3	326557	1	0
1Ka-6-4	329639	0	0	1Kr-6-4	328054	0	0	1L-6-4	328828	2	0
1Ka-6-5	327898	0	0	1Kr-6-5	328054	3	1	1L-6-5	326557	3	0
1Ka-6-6	327899	0	0	1Kr-6-6	328053	0	0	1L-6-6	326557	1	0
1Ka-6-7	325633	0	0	1Kr-6-7	328053	0	0	1L-6-7	327441	3	0
1Ka-6-8	327899	0	0	1Kr-6-8	327016	2	0	1L-6-8	327441	1	0
1Ka-6-9	327899	0	0	1Kr-6-9	327899	1	0	1L-6-9	325179	1	0
1Ka-6-10	325633	1	0	1Kr-6-10	325634	0	0	1L-6-10	326557	2	0
1Ka-7-1	327550	2	1	1Kr-7-1	327066	1	0	1L-7-1	327016	0	0
1Ka-7-2	327550	1	0	1Kr-7-2	627026	0	0	1L-7-2	329291	0	0
1Ka-7-3	328062	4	1	1Kr-7-3	327528	0	0	1L-7-3	327899	0	0
1Ka-7-4	328062	1	0	1Kr-7-4	327528	0	0	1L-7-4	327899	0	0
1Ka-7-5	326910	0	0	1Kr-7-5	327528	0	0	1L-7-5	327899	5	0
1Ka-7-6	329184	1	0	1Kr-7-6	327528	0	0	1L-7-6	325634	0	0
1Ka-7-7	326910	7	1	1Kr-7-7	327721	7	0	1L-7-7	327899	5	0
1Ka-7-8	326910	7	1	1Kr-7-8	325457	1	0	1L-7-8	325634	0	0
1Ka-7-9	326910	5	0	1Kr-7-9	327721	3	0	1L-7-9	327899	2	0
1Ka-7-10	326910	0	0	1Kr-7-10	327721	0	0	1L-7-10	327899	2	0
1Ka-8-1	328764	3	0	1Kr-8-1	326213	1	0	1L-8-1	326219	1	0
1Ka-8-2	326493	0	0	1Kr-8-2	329639	2	0	1L-8-2	328488	0	0
1Ka-8-3	328764	0	0	1Kr-8-3	329639	1	0	1L-8-3	327368	1	0
1Ka-8-4	327183	0	0	1Kr-8-4	329639	0	0	1L-8-4	329645	0	0
1Ka-8-5	327183	1	0	1Kr-8-5	327362	0	0	1L-8-5	326219	1	0
1Ka-8-6	327183	1	0	1Kr-8-6	329639	2	0	1L-8-6	326219	0	0
1Ka-8-7	327183	0	0	1Kr-8-7	329639	1	0	1L-8-7	326219	0	0
1Ka-8-8	329459	1	0	1Kr-8-8	327362	2	0	1L-8-8	326219	0	0
1Ka-8-9	327183	7	0	1Kr-8-9	327362	0	0	1L-8-9	326219	0	0
1Ka-8-10	329459	0	0	1Kr-8-10	327362	2	1	1L-8-10	326219	0	0

Tab. B7: Anzahl der verbliebenen Konidien nach Beregnung (2h nach Inokulation)

Wachse intakt

Referenz	Fläche [µm²]	Konidien	Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
RL1-1	329878	6	Ka1-1	326506	2	2	Kr1-1	326862	2	2
RL1-2	327600	9	Ka1-2	326506	3	3	Kr1-2	326426	4	4
RL1-3	327550	8	Ka1-3	326506	5	5	Kr1-3	324171	4	3
RL1-4	327550	21	Ka1-4	326118	2	2	Kr1-4	326189	4	3
RL1-5	327550	10	Ka1-5	326176	5	4	Kr1-5	326189	1	1
RL1-6	327550	15	Ka1-6	326176	3	2	Kr1-6	326088	3	3
RL1-7	327550	18	Ka1-7	326450	2	2	Kr1-7	326088	6	6
RL1-8	327550	11	Ka1-8	326176	4	4	Kr1-8	326088	2	2

RL1-9	329828	8	Ka1-9	326176	3	3	Kr1-9	326862	4	4
RL1-10	329828	7	Ka1-10	326176	4	4	Kr1-10	326426	4	3
RL2-1	327914	8	Ka2-1	327656	2	2	Kr2-1	326836	2	2
RL2-2	327062	26	Ka2-2	327656	1	1	Kr2-2	326836	3	2
RL2-3	327062	17	Ka2-3	329935	2	2	Kr2-3	326118	6	6
RL2-4	327062	8	Ka2-4	328777	5	5	Kr2-4	323865	2	2
RL2-5	327062	8	Ka2-5	329935	2	2	Kr2-5	327167	0	0
RL2-6	327062	9	Ka2-6	327677	3	3	Kr2-6	327167	3	3
RL2-7	327062	28	Ka2-7	327560	3	3	Kr2-7	326506	3	3
RL2-8	329337	74	Ka2-8	327560	1	1	Kr2-8	326506	3	3
RL2-9	329337	11	Ka2-9	327560	4	4	Kr2-9	328777	0	0
RL2-10	327062	12	Ka2-10	329838	0	0	Kr2-10	328777	4	4
RL3-1	327062	7	Ka3-1	326630	2	2	Kr3-1	326190	1	1
RL3-2	327062	8	Ka3-2	326427	4	3	Kr3-2	326427	1	1
RL3-3	327061	20	Ka3-3	326190	1	1	Kr3-3	326427	2	2
RL3-4	327061	27	Ka3-4	326190	1	1	Kr3-4	326862	2	1
RL3-5	327061	9	Ka3-5	328458	1	1	Kr3-5	326862	0	0
RL3-6	327061	13	Ka3-6	326190	1	1	Kr3-6	326426	2	2
RL3-7	327061	11	Ka3-7	326190	1	0	Kr3-7	326426	1	1
RL3-8	329336	20	Ka3-8	326190	1	1	Kr3-8	326862	1	0
RL3-9	327061	16	Ka3-9	328459	3	3	Kr3-9	326862	1	1
RL3-10	327061	6	Ka3-10	326190	2	2	Kr3-10	326862	2	2
RL4-1	327680	17	Ka4-1	326365	1	1	Kr4-1	326506	2	1
RL4-2	327680	26	Ka4-2	326365	0	0	Kr4-2	326506	1	1
RL4-3	328834	14	Ka4-3	326365	1	1	Kr4-3	327115	5	5
RL4-4	326562	12	Ka4-4	328519	1	1	Kr4-4	326837	2	2
RL4-5	326562	17	Ka4-5	326365	0	0	Kr4-5	326837	3	1
RL4-6	326562	17	Ka4-6	324111	1	1	Kr4-6	326837	0	0
RL4-7	326562	7	Ka4-7	326250	0	0	Kr4-7	326600	6	6
RL4-8	326562	22	Ka4-8	326250	0	0	Kr4-8	325669	0	0
RL4-9	326562	21	Ka4-9	326250	1	1	Kr4-9	327934	3	3
RL4-10	326562	10	Ka4-10	326250	1	1	Kr4-10	327934	6	5

Fortsetzung Tab. B7:

Wachse intakt

Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
L1-1	326663	2	2
L1-2	326663	4	3
L1-3	326663	4	4
L1-4	326663	4	4
L1-5	326663	3	3
L1-6	326663	5	5
L1-7	326663	1	1
L1-8	326663	6	6
L1-9	326266	4	3
L1-10	326266	4	3
L2-1	327239	3	2
L2-2	327651	3	3
L2-3	327874	3	3
L2-4	327874	1	1
L2-5	327874	3	2
L2-6	327875	3	2
L2-7	327597	2	2
L2-8	329876	1	1
L2-9	327597	5	5
L2-10	327597	1	1
L3-1	326332	2	2

L3-2	326332	2	2
L3-3	326332	2	2
L3-4	326266	2	2
L3-5	324012	1	1
L3-6	326266	1	1
L3-7	326663	2	2
L3-8	326663	2	2
L3-9	326663	3	3
L3-10	326663	3	1
L4-1	328834	4	4
L4-2	328834	2	2
L4-3	326562	0	0
L4-4	326562	2	2
L4-5	327732	2	2
L4-6	327656	4	4
L4-7	327656	1	1
L4-8	327656	3	3
L4-9	327656	2	2
L4-10	327656	1	1

Fortsetzung Tab. B7:

Wachse zerstört

Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
Ka5-1	326782	3	0	Kr5-1	326599	2	0	L5-1	326176	1	0
Ka5-2	326782	0	0	Kr5-2	326599	1	0	L5-2	326176	2	1
Ka5-3	325668	0	0	Kr5-3	326000	1	0	L5-3	326176	2	1
Ka5-4	326331	0	0	Kr5-4	326000	0	0	L5-4	328445	0	0
Ka5-5	328601	1	0	Kr5-5	326000	1	0	L5-5	326176	1	0
Ka5-6	326331	4	1	Kr5-6	326994	1	0	L5-6	326176	1	0
Ka5-7	326266	0	0	Kr5-7	326266	0	0	L5-7	326176	0	0
Ka5-8	326994	2	0	Kr5-8	326266	0	0	L5-8	326118	1	0
Ka5-9	326994	1	0	Kr5-9	326662	0	0	L5-9	326506	0	0
Ka5-10	329268	2	2	Kr5-10	327267	2	0	L5-10	326506	1	0
Ka6-1	326331	1	0	Kr6-1	326765	2	0	L6-1	326569	0	0
Ka6-2	326331	5	1	Kr6-2	326525	0	0	L6-2	326982	1	0
Ka6-3	327448	11	0	Kr6-3	326525	0	0	L6-3	325786	1	0
Ka6-4	326451	1	0	Kr6-4	326526	2	0	L6-4	326176	4	0
Ka6-5	326451	1	1	Kr6-5	326526	1	0	L6-5	326176	0	0
Ka6-6	326450	0	0	Kr6-6	326526	3	0	L6-6	326176	0	0
Ka6-7	326176	0	0	Kr6-7	326526	1	0	L6-7	326450	0	0
Ka6-8	326450	1	1	Kr6-8	328797	0	0	L6-8	326176	0	0
Ka6-9	326836	2	0	Kr6-9	326526	3	0	L6-9	326176	1	0
Ka6-10	326837	6	1	Kr6-10	326526	0	0	L6-10	326176	1	1
Ka7-1	327658	1	0	Kr7-1	327575	2	0	L7-1	326630	0	0
Ka7-2	327781	1	1	Kr7-2	329854	0	0	L7-2	326630	3	0
Ka7-3	327781	0	0	Kr7-3	327705	1	1	L7-3	326385	3	0
Ka7-4	327781	3	0	Kr7-4	327705	0	0	L7-4	327535	2	0
Ka7-5	327781	1	0	Kr7-5	327575	1	0	L7-5	326631	1	0
Ka7-6	327781	0	0	Kr7-6	327575	1	1	L7-6	326631	0	0
Ka7-7	327658	2	2	Kr7-7	329853	0	0	L7-7	326631	6	1
Ka7-8	327658	5	0	Kr7-8	327575	1	0	L7-8	326631	5	0
Ka7-9	329937	2	0	Kr7-9	327167	0	0	L7-9	324374	5	1
Ka7-10	327241	5	1	Kr7-10	327575	0	0	L7-10	326630	3	0
Ka8-1	327704	2	0	Kr8-1	326266	1	0	L8-1	327597	1	0
Ka8-2	327705	0	0	Kr8-2	326266	3	0	L8-2	328751	2	0
Ka8-3	327658	1	0	Kr8-3	326266	1	0	L8-3	327733	0	0
Ka8-4	327658	0	0	Kr8-4	326266	1	0	L8-4	327657	0	0

Ka8-5	327658	1	0	Kr8-5	326994	1	0	L8-5	327733	2	0
Ka8-6	327658	0	0	Kr8-6	326000	1	0	L8-6	327734	0	0
Ka8-7	327658	1	0	Kr8-7	326000	0	0	L8-7	327657	1	0
Ka8-8	327658	2	0	Kr8-8	326599	2	0	L8-8	327657	1	0
Ka8-9	327658	0	0	Kr8-9	326331	1	0	L8-9	327658	0	0
Ka8-10	327658	9	2	Kr8-10	326600	6	0	L8-10	327658	2	0

Tab. B8: Anzahl der verbliebenen Konidien nach Beregnung (3h nach Inokulation)

Wachse intakt

Referenz	Fläche [µm²]	Konidien	Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
2R-1-1	328103	93	2Ka-1-1	326704	0	0	2Kr-1-1	327081	1	0
2R-1-2	328103	93	2Ka-1-2	326823	0	0	2Kr-1-2	327604	0	0
2R-1-3	327548	100	2Ka-1-3	326823	0	0	2Kr-1-3	328481	0	0
2R-1-4	327548	75	2Ka-1-4	326823	1	1	2Kr-1-4	328481	0	0
2R-1-5	327548	79	2Ka-1-5	326823	1	0	2Kr-1-5	328481	0	0
2R-1-6	327548	82	2Ka-1-6	326704	0	0	2Kr-1-6	326030	0	0
2R-1-7	327548	62	2Ka-1-7	327417	0	0	2Kr-1-7	327431	1	0
2R-1-8	327548	80	2Ka-1-8	327417	0	0	2Kr-1-8	327951	0	0
2R-1-9	327548	51	2Ka-1-9	329695	0	0	2Kr-1-9	327951	0	0
2R-1-10	327548	58	2Ka-1-10	327417	0	0	2Kr-1-10	327951	0	0
2R-2-1	327548	105	2Ka-2-1	326560	0	0	2Kr-2-1	328408	0	0
2R-2-2	327547	114	2Ka-2-2	328832	0	0	2Kr-2-2	329532	0	0
2R-2-3	328103	80	2Ka-2-3	326560	1	0	2Kr-2-3	327592	0	0
2R-2-4	327890	76	2Ka-2-4	328832	0	0	2Kr-2-4	328131	0	0
2R-2-5	327890	115	2Ka-2-5	327256	0	0	2Kr-2-5	328131	1	0
2R-2-6	327890	121	2Ka-2-6	327256	0	0	2Kr-2-6	327603	0	0
2R-2-7	327890	68	2Ka-2-7	327256	0	0	2Kr-2-7	326730	1	1
2R-2-8	327890	80	2Ka-2-8	327256	0	0	2Kr-2-8	326730	0	0
2R-2-9	327890	75	2Ka-2-9	329532	0	0	2Kr-2-9	327256	0	0
2R-2-10	327890	65	2Ka-2-10	327256	0	0	2Kr-2-10	327256	0	0
2R-3-1	327069	85	2Ka-3-1	327817	0	0	2Kr-3-1	328422	0	0
1R-3-2	326863	74	2Ka-3-2	327817	0	0	2Kr-3-2	326154	0	0
1R-3-3	326863	57	2Ka-3-3	327817	0	0	2Kr-3-3	326154	0	0
1R-3-4	327758	65	2Ka-3-4	327817	1	0	2Kr-3-4	326154	0	0
1R-3-5	327205	59	2Ka-3-5	327817	1	1	2Kr-3-5	326154	0	0
1R-3-6	327205	92	2Ka-3-6	327817	0	0	2Kr-3-6	328422	0	0
1R-3-7	327205	95	2Ka-3-7	327817	1	1	2Kr-3-7	328422	0	0
1R-3-8	327205	92	2Ka-3-8	327817	0	0	2Kr-3-8	326154	0	0
1R-3-9	328103	123	2Ka-3-9	328681	3	1	2Kr-3-9	328422	0	0
1R-3-10	327548	86	2Ka-3-10	326411	2	1	2Kr-3-10	326154	0	0
2R-4-1	327578	94	2Ka-4-1	327431	1	1	2Kr-4-1	324922	6	3
2R-4-2	326379	113	2Ka-4-2	326908	1	0	2Kr-4-2	324922	2	0
2R-4-3	327205	75	2Ka-4-3	327080	0	0	2Kr-4-3	327182	5	3
2R-4-4	327758	119	2Ka-4-4	327603	1	0	2Kr-4-4	326348	3	1
2R-4-5	327890	120	2Ka-4-5	329882	0	0	2Kr-4-5	327774	2	1
2R-4-6	327890	129	2Ka-4-6	326730	0	0	2Kr-4-6	327774	1	1
2R-4-7	327068	72	2Ka-4-7	328299	0	0	2Kr-4-7	328618	0	0
2R-4-8	327068	111	2Ka-4-8	326731	0	0	2Kr-4-8	328618	3	2
2R-4-9	327068	90	2Ka-4-9	326560	0	0	2Kr-4-9	326348	2	0
2R-4-10	327547	71	2Ka-4-10	326560	0	0	2Kr-4-10	328618	2	2

Fortsetzung Tab. B8:

Wachse intakt

Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
2L-1-1	326212	0	0
2L-1-2	327603	3	2
2L-1-3	329882	2	1
2L-1-4	327781	0	0
2L-1-5	326908	1	0
2L-1-6	327945	0	0
2L-1-7	328481	0	0
2L-1-8	328481	2	1
2L-1-9	327431	0	0
2L-1-10	327431	4	2
2L-2-1	328180	0	0
2L-2-2	326623	1	1
2L-2-3	328895	1	0
2L-2-4	328895	1	1
2L-2-5	327822	0	0
2L-2-6	326978	1	1
2L-2-7	327464	1	0
2L-2-8	327333	1	0
2L-2-9	327334	0	0
2L-2-10	327334	0	0
2L-3-1	327689	0	0
2L-3-2	328843	0	0
2L-3-3	327774	0	0
2L-3-4	327774	0	0
2L-3-5	327774	0	0
2L-3-6	327774	0	0
2L-3-7	327774	0	0
2L-3-8	327774	0	0
2L-3-9	327774	0	0
2L-3-10	328977	0	0
2L-4-1	328618	3	0
2L-4-2	327689	0	0
2L-4-3	326749	5	1
2L-4-4	328399	2	1
2L-4-5	328400	3	1
2L-4-6	326268	2	1
2L-4-7	326268	1	1
2L-4-8	326268	0	0
2L-4-9	328537	1	0
2L-4-10	328537	2	0

Fortsetzung Tab. B8:

Wachse zerstört

Kanzler	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Kris	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt	Ludwig	Fläche [µm²]	Konidien	gekeimt
2Ka-5-1	327558	5	0	2Kr-5-1	328423	6	0	2L-5-1	327417	9	1
2Ka-5-2	327559	6	1	2Kr-5-2	328423	3	0	2L-5-2	327417	13	2
2Ka-5-3	327362	9	0	2Kr-5-3	326154	5	1	2L-5-3	327182	11	4
2Ka-5-4	325101	6	3	2Kr-5-4	328423	8	3	2L-5-4	327061	10	3
2Ka-5-5	328261	3	0	2Kr-5-5	326301	5	1	2L-5-5	327061	14	6
2Ka-5-6	328261	7	1	2Kr-5-6	326301	7	3	2L-5-6	327061	6	2
2Ka-5-7	328261	19	1	2Kr-5-7	327009	3	1	2L-5-7	327182	16	4
2Ka-5-8	328423	9	0	2Kr-5-8	327008	2	2	2L-5-8	327182	5	1

2Ka-5-9	328423	6	2	2Kr-5-9	327008	0	0	2L-5-9	327182	2	1
2Ka-5-10	326154	9	1	2Kr-5-10	327008	1	0	2L-5-10	327182	16	5
2Ka-6-1	328481	11	0	2Kr-6-1	327107	7	1	2L-6-1	328618	4	0
2Ka-6-2	328481	1	0	2Kr-6-2	328399	6	1	2L-6-2	326348	3	0
2Ka-6-3	327361	2	0	2Kr-6-3	328895	11	4	2L-6-3	326348	0	0
2Ka-6-4	327361	7	2	2Kr-6-4	328895	4	1	2L-6-4	328618	4	1
2Ka-6-5	327361	2	1	2Kr-6-5	326623	3	2	2L-6-5	328618	4	1
2Ka-6-6	327361	1	0	2Kr-6-6	326623	3	2	2L-6-6	326348	1	0
2Ka-6-7	328233	4	3	2Kr-6-7	326623	9	2	2L-6-7	328618	1	1
2Ka-6-8	327361	4	2	2Kr-6-8	327822	9	0	2L-6-8	327182	1	1
2Ka-6-9	327178	2	2	2Kr-6-9	327822	5	3	2L-6-9	327774	3	0
2Ka-6-10	327178	0	0	2Kr-6-10	326268	2	0	2L-6-10	327774	0	0
2Ka-7-1	327974	0	0	2Kr-7-1	328422	17	6	2L-7-1	327009	1	1
2Ka-7-2	327974	3	1	2Kr-7-2	328422	14	3	2L-7-2	327009	3	0
2Ka-7-3	326411	10	0	2Kr-7-3	326154	11	4	2L-7-3	327009	4	2
2Ka-7-4	326411	1	0	2Kr-7-4	328422	8	2	2L-7-4	327008	5	2
2Ka-7-5	328681	5	0	2Kr-7-5	326154	23	4	2L-7-5	324750	3	1
2Ka-7-6	326411	1	0	2Kr-7-6	326154	10	4	2L-7-6	327008	1	0
2Ka-7-7	326411	6	0	2Kr-7-7	328422	8	2	2L-7-7	328423	1	0
2Ka-7-8	326411	10	2	2Kr-7-8	326154	3	0	2L-7-8	327008	0	0
2Ka-7-9	326411	1	0	2Kr-7-9	326154	1	0	2L-7-9	326154	1	1
2Ka-7-10	328681	2	0	2Kr-7-10	328422	13	4	2L-7-10	327558	2	0
2Ka-8-1	327227	0	0	2Kr-8-1	327465	4	2	2L-8-1	326348	11	3
2Ka-8-2	326030	1	1	2Kr-8-2	326348	1	1	2L-8-2	328618	12	3
2Ka-8-3	326030	1	0	2Kr-8-3	328618	3	0	2L-8-3	328618	14	2
2Ka-8-4	326030	1	0	2Kr-8-4	326348	6	1	2L-8-4	328618	2	1
2Ka-8-5	327951	1	0	2Kr-8-5	326348	3	2	2L-8-5	328618	2	1
2Ka-8-6	327781	0	0	2Kr-8-6	326348	2	1	2L-8-6	327900	11	1
2Ka-8-7	326908	0	0	2Kr-8-7	328618	2	0	2L-8-7	326348	6	0
2Ka-8-8	328481	0	0	2Kr-8-8	326348	2	1	2L-8-8	326348	13	1
2Ka-8-9	328481	1	1	2Kr-8-9	328618	9	5	2L-8-9	326348	2	0
2Ka-8-10	326212	3	0	2Kr-8-10	326348	3	1	2L-8-10	328618	19	2

Anhang C:

Modellsystem Lotus und Mehltau: Auswirkungen von Niederschlägen auf den Befall unter Freilandbedingungen

Tab. C1: Pilzbefall von *N. nucifera* im Frühsommer 2003

Entnahme am 24.06.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
1L_a1-1	88085	0	1L_b1-1	88050	0	1L_c1-1	88084	0	1L_d1-1	88170	0
1L_a1-2	88085	0	1L_b1-2	89265	0	1L_c1-2	86872	0	1L_d1-2	88170	0
1L_a1-3	88085	0	1L_b1-3	89265	0	1L_c1-3	86872	0	1L_d1-3	88170	0
1L_a1-4	88085	0	1L_b1-4	89265	0	1L_c1-4	87476	0	1L_d1-4	87561	0
1L_a1-5	88085	0	1L_b1-5	89265	0	1L_c1-5	86872	0	1L_d1-5	88170	0
1L_a2-1	88085	0	1L_b2-1	90511	0	1L_c2-1	86575	0	1L_d2-1	88157	0
1L_a2-2	88085	0	1L_b2-2	89886	0	1L_c2-2	86575	0	1L_d2-2	87548	0
1L_a2-3	88084	0	1L_b2-3	88649	0	1L_c2-3	87784	0	1L_d2-3	87548	0
1L_a2-4	88084	0	1L_b2-4	89886	0	1L_c2-4	87178	0	1L_d2-4	87548	0
1L_a2-5	88084	0	1L_b2-5	89886	0	1L_c2-5	87178	0	1L_d2-5	87548	0
1L_a3-1	87476	0	1L_b3-1	90511	0	1L_c3-1	87178	0	1L_d3-1	87548	0
1L_a3-2	88084	0	1L_b3-2	89265	0	1L_c3-2	87784	0	1L_d3-2	88157	0
1L_a3-3	88084	0	1L_b3-3	89886	0	1L_c3-3	86575	0	1L_d3-3	88157	0
1L_a3-4	88084	0	1L_b3-4	90511	0	1L_c3-4	87178	0,34	1L_d3-4	88157	0
1L_a3-5	88084	0	1L_b3-5	88036	0	1L_c3-5	87178	0	1L_d3-5	88157	0
1L_a4-1	88084	0	1L_b4-1	88649	0	1L_c4-1	87178	0	1L_d4-1	88157	0
1L_a4-2	88084	0	1L_b4-2	88649	0	1L_c4-2	86575	0	1L_d4-2	88157	0
1L_a4-3	87476	0	1L_b4-3	89886	0	1L_c4-3	87178	0	1L_d4-3	87548	0
1L_a4-4	88084	0	1L_b4-4	90511	0	1L_c4-4	86576	0	1L_d4-4	87548	0,19
1L_a4-5	88084	0	1L_b4-5	89265	0	1L_c4-5	86576	0	1L_d4-5	88147	0
1L_a5-1	88084	0	1L_b5-1	89265	0	1L_c5-1	86575	0	1L_d5-1	88147	0
1L_a5-2	88084	0	1L_b5-2	90511	0	1L_c5-2	87178	0	1L_d5-2	88147	0
1L_a5-3	88084	0	1L_b5-3	89886	0	1L_c5-3	87178	0	1L_d5-3	88147	0
1L_a5-4	88084	0	1L_b5-4	89886	0	1L_c5-4	87178	0	1L_d5-4	87538	0
1L_a5-5	88084	0	1L_b5-5	89265	0	1L_c5-5	87178	0	1L_d5-5	87538	0
1L_a6-1	88697	0	1L_b6-1	89265	0	1L_c6-1	87178	0	1L_d6-1	88147	0
1L_a6-2	88084	0	1L_b6-2	89265	0	1L_c6-2	86576	0	1L_d6-2	88147	0
1L_a6-3	88084	0	1L_b6-3	89265	0	1L_c6-3	86576	0	1L_d6-3	86933	0
1L_a6-4	88084	0	1L_b6-4	89265	0	1L_c6-4	87178	0	1L_d6-4	87538	0
1L_a6-5	87476	0	1L_b6-5	89265	0	1L_c6-5	87178	0	1L_d6-5	87538	0
1L_a7-1	88084	0	1L_b7-1	90511	0	1L_c7-1		-	1L_d7-1	88147	0
1L_a7-2	87476	0	1L_b7-2	89265	0	1L_c7-2		-	1L_d7-2	88147	0
1L_a7-3	88084	0	1L_b7-3	89265	0	1L_c7-3		-	1L_d7-3	88147	0
1L_a7-4	87476	0	1L_b7-4	90511	0	1L_c7-4		-	1L_d7-4	88147	0
1L_a7-5	87476	0	1L_b7-5	90511	0	1L_c7-5		-	1L_d7-5	88147	0
1L_a8-1	88084	0	1L_b8-1	90511	0	1L_c8-1	87784	0	1L_d8-1	88147	0
1L_a8-2	87476	0	1L_b8-2	89265	0	1L_c8-2	87178	0	1L_d8-2	88147	0
1L_a8-3	88084	0	1L_b8-3	89265	0	1L_c8-3	87178	0	1L_d8-3	88147	0
1L_a8-4	87476	0	1L_b8-4	89265	0	1L_c8-4	87178	0	1L_d8-4	88147	0
1L_a8-5	87476	0	1L_b8-5	89265	0	1L_c8-5	87178	0	1L_d8-5	88147	0
1L_a9-1	88084	0	1L_b9-1	89265	0	1L_c9-1		-	1L_d9-1	87538	0
1L_a9-2	88084	0	1L_b9-2	89265	0	1L_c9-2		-	1L_d9-2	88147	0
1L_a9-3	87476	0	1L_b9-3	89886	0	1L_c9-3		-	1L_d9-3	87538	0
1L_a9-4	88084	0	1L_b9-4	89886	0	1L_c9-4		-	1L_d9-4	88147	0
1L_a9-5	88084	0	1L_b9-5	89886	0	1L_c9-5		-	1L_d9-5	88147	0
1L_a10-1	88084	0	1L_b10-1	89886	0	1L_c10-1	86872	0	1L_d10-1	88147	0
1L_a10-2	88697	0	1L_b10-2	88649	0	1L_c10-2	86272	0	1L_d10-2	88147	0
1L_a10-3	88084	0	1L_b10-3	90511	0	1L_c10-3	87476	0	1L_d10-3	87538	0

1L_a10-4	88084	0	1L_b10-4	89886	0	1L_c10-4	87476	0	1L_d10-4	88147	0
1L_a10-5	88084	0	1L_b10-5	89886	0	1L_c10-5	87476	0	1L_d10-5	88147	0,22

Fortsetzung Tab. C1:

Entnahme am 01.07.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
2L_a1-1	88199	0	2L_b1-1	88815	0	2L_c1-1	88170	0	2L_d1-1	87589	0
2L_a1-2	88199	0	2L_b1-2	88202	0	2L_c1-2	88459	0	2L_d1-2	87291	0
2L_a1-3	88812	0	2L_b1-3	88815	0	2L_c1-3	87848	0	2L_d1-3	87291	0
2L_a1-4	88199	0	2L_b1-4	88504	0	2L_c1-4	88124	0	2L_d1-4	86688	0
2L_a1-5	87589	0	2L_b1-5	88504	0	2L_c1-5	87516	0	2L_d1-5	88509	0
2L_a2-1	88812	0	2L_b2-1	89119	0	2L_c2-1	88124	0	2L_d2-1	87898	0
2L_a2-2	88199	0	2L_b2-2	89119	0	2L_c2-2	88426	0	2L_d2-2	87898	0
2L_a2-3	88812	0	2L_b2-3	89119	0	2L_c2-3	89041	0,16	2L_d2-3	87898	0
2L_a2-4	87589	0	2L_b2-4	88504	0	2L_c2-4	88426	0	2L_d2-4	87898	0
2L_a2-5	88199	0	2L_b2-5	89119	0	2L_c2-5	88426	0	2L_d2-5	87291	0
2L_a3-1	87589	0	2L_b3-1	89119	0	2L_c3-1	87815	0	2L_d3-1	87291	0
2L_a3-2	88199	0	2L_b3-2	88504	0	2L_c3-2	88426	1,1	2L_d3-2	87898	0
2L_a3-3	87589	0	2L_b3-3	89119	0	2L_c3-3	88426	0	2L_d3-3	87898	0
2L_a3-4	88199	0	2L_b3-4	89119	0	2L_c3-4	88426	0	2L_d3-4	87291	0
2L_a3-5	88199	0	2L_b3-5	88504	0	2L_c3-5	87208	0	2L_d3-5	87898	0
2L_a4-1	88199	0	2L_b4-1	89119	0	2L_c4-1	87815	0	2L_d4-1	87898	0
2L_a4-2	88199	0	2L_b4-2	88504	0	2L_c4-2	87815	0	2L_d4-2	87291	0
2L_a4-3	88199	0	2L_b4-3	89119	0	2L_c4-3	87815	0	2L_d4-3	87291	0
2L_a4-4	87589	0	2L_b4-4	89119	0	2L_c4-4	87815	0	2L_d4-4	87898	0
2L_a4-5	88199	0	2L_b4-5	89119	0	2L_c4-5	87815	0	2L_d4-5	87898	0
2L_a5-1	88199	0	2L_b5-1	89119	0	2L_c5-1	87815	0	2L_d5-1	87898	0
2L_a5-2	88199	0	2L_b5-2	88504	0	2L_c5-2	89041	0	2L_d5-2	87291	0
2L_a5-3	88199	0	2L_b5-3	88504	0	2L_c5-3	88426	0	2L_d5-3	87898	0
2L_a5-4	87589	0	2L_b5-4	88504	0	2L_c5-4	88426	4,21	2L_d5-4	87898	0
2L_a5-5	88199	0	2L_b5-5	88504	0	2L_c5-5	88034	8,21	2L_d5-5	87898	0
2L_a6-1	88199	0	2L_b6-1	89119	0	2L_c6-1	88034	0	2L_d6-1	88199	0
2L_a6-2	88199	0	2L_b6-2	88504	0	2L_c6-2	87426	0	2L_d6-2	88199	0
2L_a6-3	88199	0	2L_b6-3	89119	0	2L_c6-3	88034	0	2L_d6-3	88199	0
2L_a6-4	88812	0	2L_b6-4	89739	0	2L_c6-4	88034	0	2L_d6-4	88199	0
2L_a6-5	88199	0	2L_b6-5	89119	0	2L_c6-5	87426	0	2L_d6-5	87590	0
2L_a7-1	88199	0	2L_b7-1	88504	0	2L_c7-1	88034	0	2L_d7-1	88199	0
2L_a7-2	88199	0	2L_b7-2	89119	0	2L_c7-2	88034	0,15	2L_d7-2	87590	0
2L_a7-3	88199	0	2L_b7-3	89119	0	2L_c7-3	88034	0	2L_d7-3	87590	0
2L_a7-4	87589	0	2L_b7-4	87892	0	2L_c7-4	88034	2,07	2L_d7-4	87898	0
2L_a7-5	88199	0	2L_b7-5	88504	0	2L_c7-5	88034	0	2L_d7-5	87898	0
2L_a8-1	87589	0	2L_b8-1	89119	0	2L_c8-1	88815	0	2L_d8-1	87898	0
2L_a8-2	86384	0	2L_b8-2	89119	0	2L_c8-2	88202	0	2L_d8-2	87898	0
2L_a8-3	88199	0	2L_b8-3	89119	0	2L_c8-3	88815	0	2L_d8-3	87291	0
2L_a8-4	88199	0	2L_b8-4	87892	0	2L_c8-4	88815	0	2L_d8-4	87291	0
2L_a8-5	87589	0	2L_b8-5	89119	0	2L_c8-5	88815	0	2L_d8-5	87291	0
2L_a9-1	87589	0	2L_b9-1	88504	0	2L_c9-1	89433	0	2L_d9-1	87898	0
2L_a9-2	88199	0	2L_b9-2	89119	0	2L_c9-2	88815	0	2L_d9-2	87898	0
2L_a9-3	88199	0	2L_b9-3	89119	0	2L_c9-3	88815	0,31	2L_d9-3	87898	0
2L_a9-4	87589	0	2L_b9-4	87892	0	2L_c9-4	88202	0	2L_d9-4	87898	0
2L_a9-5	88199	0	2L_b9-5	88504	0	2L_c9-5	88815	0	2L_d9-5	87898	0
2L_a10-1	88199	0	2L_b10-1	88504	0	2L_c10-1	88199	0	2L_d10-1	87291	0
2L_a10-2	88199	0	2L_b10-2	89119	0	2L_c10-2	88199	0	2L_d10-2	87898	0
2L_a10-3	88199	0	2L_b10-3	89119	0	2L_c10-3	88199	0	2L_d10-3	87291	0
2L_a10-4	87589	0	2L_b10-4	88504	0	2L_c10-4	87589	0	2L_d10-4	87291	0
2L_a10-5	88199	0	2L_b10-5	89119	0	2L_c10-5	88199	0	2L_d10-5	87291	0

Fortsetzung Tab. C1:

Entnahme am 08.07.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
3L_a1-1	88177	0	3L_b1-1	88100	0	3L_c1-1	87790	1,13	3L_d1-1	88027	0
3L_a1-2	87555	0	3L_b1-2	88100	0	3L_c1-2	87790	0	3L_d1-2	88027	0
3L_a1-3	87555	0	3L_b1-3	86286	0	3L_c1-3	87790	6,33	3L_d1-3	88027	0
3L_a1-4	87555	0	3L_b1-4	87491	0	3L_c1-4	87790	15,83	3L_d1-4	88014	0
3L_a1-5	87555	0	3L_b1-5	88100	0	3L_c1-5	87790	18,24	3L_d1-5	87406	0
3L_a2-1	88164	0	3L_b2-1	87790	0	3L_c2-1	87184	0	3L_d2-1	88014	0
3L_a2-2	88777	0	3L_b2-2	87184	0	3L_c2-2	87790	0	3L_d2-2	87406	0
3L_a2-3	88164	0	3L_b2-3	87184	0	3L_c2-3	87184	0	3L_d2-3	88014	0
3L_a2-4	88164	0	3L_b2-4	88090	0	3L_c2-4	87184	0	3L_d2-4	88014	0
3L_a2-5	88465	0	3L_b2-5	88090	0	3L_c2-5	87184	1,94	3L_d2-5	88014	0
3L_a3-1	87854	0	3L_b3-1	88090	0	3L_c3-1	87184	0	3L_d3-1	88014	0
3L_a3-2	87854	0	3L_b3-2	87482	0	3L_c3-2	87790	0	3L_d3-2	88014	0
3L_a3-3	88465	0	3L_b3-3	88401	0	3L_c3-3	87184	0	3L_d3-3	88014	0,21
3L_a3-4	88465	0	3L_b3-4	87790	0	3L_c3-4	88401	0	3L_d3-4	88014	0
3L_a3-5	88465	0	3L_b3-5	87790	0	3L_c3-5	87184	0	3L_d3-5	86802	0
3L_a4-1	87854	0	3L_b4-1	87184	0	3L_c4-1	86582	0	3L_d4-1	88315	0
3L_a4-2	87854	0	3L_b4-2	87790	0	3L_c4-2	87790	0,48	3L_d4-2	88194	0
3L_a4-3	88465	0	3L_b4-3	87482	0	3L_c4-3	87790	0	3L_d4-3	88194	0
3L_a4-4	88465	0	3L_b4-4	87482	0	3L_c4-4	87184	0	3L_d4-4	88194	0
3L_a4-5	88465	0	3L_b4-5	87482	0	3L_c4-5	87184	0	3L_d4-5	88194	0
3L_a5-1	89081	0	3L_b5-1	87482	0,06	3L_c5-1	87790	0	3L_d5-1	87871	0,07
3L_a5-2	88465	0,12	3L_b5-2	87482	0	3L_c5-2	87790	0	3L_d5-2	88482	0
3L_a5-3	88465	0	3L_b5-3	88090	0	3L_c5-3	87184	0	3L_d5-3	87871	0
3L_a5-4	88465	0	3L_b5-4	88091	0	3L_c5-4	87790	0	3L_d5-4	88482	0,08
3L_a5-5	88465	0	3L_b5-5	88091	0	3L_c5-5	87184	0	3L_d5-5	88482	0
3L_a6-1	88465	0	3L_b6-1	87482	0	3L_c6-1	87184	0	3L_d6-1	88482	0
3L_a6-2	87854	0	3L_b6-2	88091	0	3L_c6-2	87184	0	3L_d6-2	88482	0
3L_a6-3	87854	0	3L_b6-3	87482	0	3L_c6-3	87184	0	3L_d6-3	88483	0
3L_a6-4	88465	0	3L_b6-4	88091	0,13	3L_c6-4	87790	0	3L_d6-4	87264	0
3L_a6-5	88465	0	3L_b6-5	88091	0	3L_c6-5	87184	0	3L_d6-5	87871	0
3L_a7-1	88465	0	3L_b7-1	88091	0	3L_c7-1	87184	0	3L_d7-1	88482	0
3L_a7-2	88465	0	3L_b7-2	88091	0	3L_c7-2	87790	0	3L_d7-2	88482	0
3L_a7-3	88465	0	3L_b7-3	87482	0	3L_c7-3	87790	0	3L_d7-3	87871	0
3L_a7-4	87854	0	3L_b7-4	88091	0	3L_c7-4	87184	0	3L_d7-4	87871	0
3L_a7-5	88465	0	3L_b7-5	87482	0	3L_c7-5	87184	0	3L_d7-5	87871	0
3L_a8-1	88465	0	3L_b8-1	87482	0	3L_c8-1	87790	0,09	3L_d8-1	88482	0
3L_a8-2	87247	0	3L_b8-2	87790	0	3L_c8-2	87184	0	3L_d8-2	88482	0
3L_a8-3	87854	0	3L_b8-3	87790	0	3L_c8-3	87790	0	3L_d8-3	88482	0
3L_a8-4	88465	0	3L_b8-4	87184	0	3L_c8-4	87184	0	3L_d8-4	88482	0
3L_a8-5	88465	0	3L_b8-5	87790	0	3L_c8-5	87184	0	3L_d8-5	87871	0
3L_a9-1	88465	0,1	3L_b9-1	87184	0	3L_c9-1	86582	3,53	3L_d9-1	87871	0
3L_a9-2	87854	0	3L_b9-2	87790	0	3L_c9-2	87184	6,54	3L_d9-2	88483	0
3L_a9-3	87854	0	3L_b9-3	87184	0	3L_c9-3	87790	0,07	3L_d9-3	88483	0
3L_a9-4	87854	0	3L_b9-4	87184	0	3L_c9-4	87790	0	3L_d9-4	88483	0
3L_a9-5	87854	0	3L_b9-5	87790	0	3L_c9-5	87790	0	3L_d9-5	88483	0
3L_a10-1	88465	0	3L_b10-1	87174	0	3L_c10-1	88401	0	3L_d10-1	87264	0
3L_a10-2	88465	0	3L_b10-2	87184	0	3L_c10-2	87184	0,51	3L_d10-2	87871	0
3L_a10-3	88465	0	3L_b10-3	87790	0	3L_c10-3	87184	0	3L_d10-3	87871	0
3L_a10-4	88465	0	3L_b10-4	86582	0	3L_c10-4	87790	0	3L_d10-4	88483	0
3L_a10-5	88465	0	3L_b10-5	87790	0	3L_c10-5	87790	0	3L_d10-5	88483	0

Fortsetzung Tab. C1:

Entnahme am 15.07.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
4L_a1-1	88242	0,18	4L_b1-1	88065	0	4L_c1-1	88805	6,57	4L_d1-1	88103	0
4L_a1-2	88856	0	4L_b1-2	87547	0,88	4L_c1-2	88805	1,38	4L_d1-2	88103	0
4L_a1-3	88856	0	4L_b1-3	88065	6,87	4L_c1-3	88792	0,78	4L_d1-3	88103	0
4L_a1-4	88856	0,14	4L_b1-4	88065	0	4L_c1-4	88792	7,95	4L_d1-4	88103	0
4L_a1-5	88482	0,13	4L_b1-5	88065	0	4L_c1-5	88792	0	4L_d1-5	88103	0
4L_a2-1	88482	0	4L_b2-1	88065	0	4L_c2-1	88792	10,3	4L_d2-1	88391	0
4L_a2-2	88482	0	4L_b2-2	88678	0	4L_c2-2	88792	11,74	4L_d2-2	88391	0
4L_a2-3	89098	0	4L_b2-3	87457	0	4L_c2-3	88792	0,48	4L_d2-3	87780	0
4L_a2-4	87871	0	4L_b2-4	88065	0	4L_c2-4	88792	6,21	4L_d2-4	87780	0
4L_a2-5	88794	0	4L_b2-5	88065	0	4L_c2-5	88792	0	4L_d2-5	88391	0
4L_a3-1	88794	0	4L_b3-1	88366	0	4L_c3-1	88792	7,4	4L_d3-1	87780	0
4L_a3-2	88181	0	4L_b3-2	88366	0	4L_c3-2	88792	17,89	4L_d3-2	88391	0
4L_a3-3	88181	0	4L_b3-3	87756	0	4L_c3-3	88792	17,72	4L_d3-3	88391	0
4L_a3-4	88181	0	4L_b3-4	88366	0	4L_c3-4	88792	4,06	4L_d3-4	88391	0
4L_a3-5	88181	0,49	4L_b3-5	87756	0	4L_c3-5	88792	9,8	4L_d3-5	88391	0
4L_a4-1	88482	0	4L_b4-1	87756	0	4L_c4-1	88792	0,81	4L_d4-1	88391	0
4L_a4-2	88482	0	4L_b4-2	87756	0	4L_c4-2	88792	0	4L_d4-2	88391	0
4L_a4-3	88482	0	4L_b4-3	87756	0	4L_c4-3	88792	9,51	4L_d4-3	87780	0
4L_a4-4	88482	0	4L_b4-4	88366	0	4L_c4-4	88792	3,45	4L_d4-4	87780	0
4L_a4-5	87871	0	4L_b4-5	88366	0	4L_c4-5	88792	9,3	4L_d4-5	88391	0
4L_a5-1	88482	0	4L_b5-1	87150	0	4L_c5-1	88792	3,9	4L_d5-1	89006	0
4L_a5-2	88482	0	4L_b5-2	88981	0	4L_c5-2	88792	6,95	4L_d5-2	87780	0
4L_a5-3	88482	0	4L_b5-3	87756	0	4L_c5-3	88792	1,48	4L_d5-3	88391	0
4L_a5-4	88482	0	4L_b5-4	87756	0	4L_c5-4	88792	1,57	4L_d5-4	88391	0
4L_a5-5	88482	0,1	4L_b5-5	88366	0	4L_c5-5	88792	8,83	4L_d5-5	88391	0
4L_a6-1	87871	0	4L_b6-1	87756	0	4L_c6-1		-	4L_d6-1	88391	0
4L_a6-2	87871	0,49	4L_b6-2	88366	0	4L_c6-2		-	4L_d6-2	88391	0
4L_a6-3	87264	0	4L_b6-3	88366	0	4L_c6-3		-	4L_d6-3	88391	0
4L_a6-4	87871	0	4L_b6-4	87756	0	4L_c6-4		-	4L_d6-4	88391	0,9
4L_a6-5	87871	0	4L_b6-5	88366	0	4L_c6-5		-	4L_d6-5	87780	0
4L_a7-1	87871	0	4L_b7-1	88366	0	4L_c7-1	88792	0	4L_d7-1	88391	0
4L_a7-2	89098	0	4L_b7-2	88366	0	4L_c7-2	88792	6,3	4L_d7-2	87780	0
4L_a7-3	88482	0	4L_b7-3	88981	0	4L_c7-3	88792	0	4L_d7-3	89006	0
4L_a7-4	88482	0,33	4L_b7-4	88366	0	4L_c7-4	88792	6,14	4L_d7-4	88391	0
4L_a7-5	88482	0	4L_b7-5	88981	0	4L_c7-5	88792	0	4L_d7-5	87780	0
4L_a8-1	88160	0	4L_b8-1	88160	0	4L_c8-1	88792	5,69	4L_d8-1		-
4L_a8-2	87551	0	4L_b8-2	87551	0	4L_c8-2	88792	2,27	4L_d8-2		-
4L_a8-3	88160	0	4L_b8-3	88160	0	4L_c8-3	89410	4,27	4L_d8-3		-
4L_a8-4	87551	0	4L_b8-4	87551	0,64	4L_c8-4	88792	1,64	4L_d8-4		-
4L_a8-5	88160	0	4L_b8-5	88160	0	4L_c8-5	88792	1,32	4L_d8-5		-
4L_a9-1	87551	0	4L_b9-1	87551	0	4L_c9-1	88792	7,83	4L_d9-1	87780	0
4L_a9-2	88160	0	4L_b9-2	88160	0	4L_c9-2	88792	3,13	4L_d9-2	88391	0
4L_a9-3	88160	0	4L_b9-3	88160	0	4L_c9-3	88792	0,17	4L_d9-3	88391	0
4L_a9-4	88160	0	4L_b9-4	88160	0	4L_c9-4	88792	14,4	4L_d9-4	88391	0
4L_a9-5	88160	0	4L_b9-5	88160	0	4L_c9-5	89410	13,75	4L_d9-5	88391	0
4L_a10-1	87551	0	4L_b10-1	87551	0	4L_c10-1	88792	0,18	4L_d10-1	89006	0
4L_a10-2	87551	0	4L_b10-2	87551	0	4L_c10-2	89410	0,07	4L_d10-2	88391	0
4L_a10-3	87551	0	4L_b10-3	87551	0	4L_c10-3	88792	0	4L_d10-3	88391	0
4L_a10-4	87551	0	4L_b10-4	87551	0	4L_c10-4	88792	0,5	4L_d10-4	87780	0
4L_a10-5	87551	0	4L_b10-5	87551	0	4L_c10-5	88179	0,33	4L_d10-5	88391	0

Fortsetzung Tab. C1:

Entnahme am 22.07.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
5L_a1-1	88366	0	5L_b1-1	88168	0	5L_c1-1	88194	4,21	5L_d1-1	89098	0
5L_a1-2	88366	0	5L_b1-2	88168	0	5L_c1-2	88194	14,46	5L_d1-2	87871	0
5L_a1-3	87756	0,25	5L_b1-3	88167	0	5L_c1-3	87585	0,97	5L_d1-3	88482	0
5L_a1-4	86548	0	5L_b1-4	88781	0	5L_c1-4	88194	19,76	5L_d1-4	88482	0
5L_a1-5	86548	0	5L_b1-5	88781	0	5L_c1-5	88194	1,64	5L_d1-5	87871	0
5L_a2-1	88366	0	5L_b2-1	88781	0	5L_c2-1	87871	22,1	5L_d2-1	87871	0
5L_a2-2	88981	0,48	5L_b2-2	89398	0	5L_c2-2	88482	5,9	5L_d2-2	87871	0
5L_a2-3	88366	0	5L_b2-3	88781	0	5L_c2-3	88482	12,86	5L_d2-3	88482	0
5L_a2-4	88366	0,33	5L_b2-4	88167	0	5L_c2-4	88482	6,8	5L_d2-4	88482	0
5L_a2-5	88366	0,34	5L_b2-5	88167	0	5L_c2-5	88482	4,85	5L_d2-5	88482	0,17
5L_a3-1	87756	0	5L_b3-1	88167	0	5L_c3-1	88482	2,67	5L_d3-1	88482	0
5L_a3-2	87150	0	5L_b3-2	88781	0	5L_c3-2	87871	5,94	5L_d3-2	87871	0
5L_a3-3	86548	0	5L_b3-3	88167	0	5L_c3-3	88482	4,3	5L_d3-3	88482	0
5L_a3-4	87756	0	5L_b3-4	88167	0	5L_c3-4	87871	2,29	5L_d3-4	88482	0
5L_a3-5	87756	0	5L_b3-5	88167	0	5L_c3-5	87871	0,56	5L_d3-5	88482	0
5L_a4-1	88366	0	5L_b4-1	88781	0	5L_c4-1	88482	15,98	5L_d4-1	88482	0
5L_a4-2	88366	0	5L_b4-2	89398	0,18	5L_c4-2	88482	11,89	5L_d4-2	88482	0
5L_a4-3	88366	0	5L_b4-3	88781	0	5L_c4-3	88482	7,05	5L_d4-3	88482	0
5L_a4-4	88366	0	5L_b4-4	88781	0,39	5L_c4-4	88482	2,55	5L_d4-4	87264	0
5L_a4-5	88366	0	5L_b4-5	88167	0	5L_c4-5	88482	11,23	5L_d4-5	88482	0
5L_a5-1	88981	0	5L_b5-1	88167	0	5L_c5-1	88482	20,21	5L_d5-1	88482	0
5L_a5-2	88366	0,39	5L_b5-2	88167	0	5L_c5-2	88482	14,32	5L_d5-2	88482	0
5L_a5-3	88366	0	5L_b5-3	88167	0	5L_c5-3	88482	15,12	5L_d5-3	88482	0
5L_a5-4	88981	0	5L_b5-4	88167	0	5L_c5-4	88482	5,34	5L_d5-4	87871	0
5L_a5-5	88981	0	5L_b5-5	88167	0	5L_c5-5	88482	12,55	5L_d5-5	87871	0
5L_a6-1	87756	0	5L_b6-1	89398	0	5L_c6-1	87871	10,54	5L_d6-1	87871	0
5L_a6-2	87756	0	5L_b6-2	88781	0	5L_c6-2	88482	15,58	5L_d6-2	88482	0
5L_a6-3	88981	0	5L_b6-3	88781	0	5L_c6-3	87871	13,38	5L_d6-3	87264	0
5L_a6-4	88366	0	5L_b6-4	88781	0	5L_c6-4	87264	6,05	5L_d6-4	87871	0
5L_a6-5	88366	0	5L_b6-5	88781	0	5L_c6-5	88482	10,39	5L_d6-5	87871	0
5L_a7-1	88366	0	5L_b7-1	88781	0	5L_c7-1	88482	3,09	5L_d7-1	88482	0
5L_a7-2	88366	0	5L_b7-2	88167	0	5L_c7-2	87871	4,68	5L_d7-2	87871	0
5L_a7-3	88366	0,76	5L_b7-3	88167	0	5L_c7-3	87871	5,1	5L_d7-3	88482	0
5L_a7-4	87756	0	5L_b7-4	87558	0	5L_c7-4	88482	6,53	5L_d7-4	88482	0
5L_a7-5	87756	0	5L_b7-5	87558	0	5L_c7-5	88482	2,33	5L_d7-5	88482	0
5L_a8-1	87756	0	5L_b8-1	88781	0	5L_c8-1	88482	14,51	5L_d8-1	88482	0
5L_a8-2	87756	0	5L_b8-2	88781	0	5L_c8-2	87871	18,55	5L_d8-2	87871	0
5L_a8-3	87756	0	5L_b8-3	88781	0	5L_c8-3	88482	21,27	5L_d8-3	88482	0
5L_a8-4	88981	0	5L_b8-4	88781	0	5L_c8-4	88482	16,28	5L_d8-4	88482	0
5L_a8-5	88981	0	5L_b8-5	88781	0	5L_c8-5	88482	11,2	5L_d8-5	88482	0
5L_a9-1	87756	0	5L_b9-1	88167	0	5L_c9-1	87871	11,04	5L_d9-1	88482	0
5L_a9-2	87756	0	5L_b9-2	88167	0	5L_c9-2	87264	2,28	5L_d9-2	88482	0
5L_a9-3	87756	0	5L_b9-3	88781	0,33	5L_c9-3	87871	8,97	5L_d9-3	88482	0
5L_a9-4	88981	0	5L_b9-4	88781	0	5L_c9-4	89098	2,68	5L_d9-4	88482	0
5L_a9-5	88981	0	5L_b9-5	88781	0	5L_c9-5	88482	10,52	5L_d9-5	88482	0
5L_a10-1	87756	0,35	5L_b10-1	88781	0	5L_c10-1	88482	8,39	5L_d10-1	88482	0
5L_a10-2	87756	0	5L_b10-2	88781	0	5L_c10-2	88482	11,46	5L_d10-2	87264	0
5L_a10-3	87756	0,54	5L_b10-3	88167	0,22	5L_c10-3	88482	7,09	5L_d10-3	87264	0
5L_a10-4	87756	0,34	5L_b10-4	88781	0,29	5L_c10-4	88482	21,08	5L_d10-4	88482	0
5L_a10-5	87756	0	5L_b10-5	88167	0	5L_c10-5	88482	13,12	5L_d10-5	88482	0

Fortsetzung Tab. C1:

Entnahme am 29.07.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
6L_a1-1	88179	0	6L_b1-1	88168	0	6L_c1-1	88366	22,98	6L_d1-1	88179	0
6L_a1-2	88179	0	6L_b1-2	88168	0	6L_c1-2	88366	21,3	6L_d1-2	88179	0
6L_a1-3	88179	0	6L_b1-3	88781	0	6L_c1-3	88366	14,73	6L_d1-3	88792	0
6L_a1-4	88179	0	6L_b1-4	88781	0	6L_c1-4	88366	29,81	6L_d1-4	88179	0
6L_a1-5	88179	0	6L_b1-5	88781	0	6L_c1-5	88366	26,32	6L_d1-5	88179	0
6L_a2-1	88179	0	6L_b2-1	88781	0	6L_c2-1	87756	16,3	6L_d2-1	88179	0
6L_a2-2	88179	0	6L_b2-2	88781	0	6L_c2-2	88366	20,71	6L_d2-2	88179	0
6L_a2-3	88179	0	6L_b2-3	88168	0	6L_c2-3	87756	22,87	6L_d2-3	88179	0
6L_a2-4	88179	0	6L_b2-4	88781	0	6L_c2-4	87756	26,59	6L_d2-4	88179	0
6L_a2-5	88179	0	6L_b2-5	88781	0	6L_c2-5	87756	26,94	6L_d2-5	88179	0
6L_a3-1	88179	0	6L_b3-1	88168	0	6L_c3-1		-	6L_d3-1	88179	3,19
6L_a3-2	88179	0	6L_b3-2	88168	0	6L_c3-2		-	6L_d3-2	88179	0
6L_a3-3	88179	0	6L_b3-3	88781	0	6L_c3-3		-	6L_d3-3	88179	1,43
6L_a3-4	88179	0	6L_b3-4	88781	1,39	6L_c3-4		-	6L_d3-4	88179	0
6L_a3-5	88179	0	6L_b3-5	89398	3,89	6L_c3-5		-	6L_d3-5	88179	0
6L_a4-1	88179	0	6L_b4-1	88781	0,62	6L_c4-1	88366	10,61	6L_d4-1	88179	0
6L_a4-2	88179	0	6L_b4-2	88168	0	6L_c4-2	88366	16,15	6L_d4-2	88179	0
6L_a4-3	88179	0	6L_b4-3	88781	7,19	6L_c4-3	88981	18,27	6L_d4-3	88179	0
6L_a4-4	88179	0	6L_b4-4	88781	0	6L_c4-4	87756	12,95	6L_d4-4	88179	0
6L_a4-5	88179	0	6L_b4-5	88781	0	6L_c4-5	87756	29,16	6L_d4-5	88179	0
6L_a5-1	88179	0	6L_b5-1	88781	0	6L_c5-1	88981	11,85	6L_d5-1	88179	0
6L_a5-2	88179	0,1	6L_b5-2	88781	0	6L_c5-2	87756	20,6	6L_d5-2	88179	0
6L_a5-3	88179	0	6L_b5-3	88781	0	6L_c5-3	88366	20,44	6L_d5-3	88179	0
6L_a5-4	88179	0	6L_b5-4	88168	0	6L_c5-4	87756	28,61	6L_d5-4	88179	0
6L_a5-5	88179	0	6L_b5-5	88168	0,31	6L_c5-5	87756	27,24	6L_d5-5	88179	0
6L_a6-1	88179	0,9	6L_b6-1	88781	0	6L_c6-1	88981	22	6L_d6-1	88179	12,3
6L_a6-2	88179	0	6L_b6-2	88781	0	6L_c6-2	87756	23,86	6L_d6-2	88179	22,11
6L_a6-3	88179	0	6L_b6-3	88781	0	6L_c6-3	88366	11,55	6L_d6-3	88179	23,04
6L_a6-4	88179	0	6L_b6-4	88781	0	6L_c6-4	88366	14,5	6L_d6-4	88179	8,31
6L_a6-5	88179	0	6L_b6-5	88781	0	6L_c6-5	88366	18,51	6L_d6-5	88179	3,07
6L_a7-1	88179	0	6L_b7-1	88781	3,05	6L_c7-1	88366	20,47	6L_d7-1	88179	1,16
6L_a7-2	88179	0	6L_b7-2	88781	3,73	6L_c7-2	88981	14,55	6L_d7-2	88179	0
6L_a7-3	88179	0	6L_b7-3	89398	6,96	6L_c7-3	88981	10,77	6L_d7-3	88179	0
6L_a7-4	88179	0	6L_b7-4	88781	1,95	6L_c7-4	88366	14,73	6L_d7-4	88179	1,19
6L_a7-5	88179	0	6L_b7-5	88781	0	6L_c7-5	88366	19,64	6L_d7-5	88179	6,59
6L_a8-1	88179	0	6L_b8-1	88781	0	6L_c8-1	88366	16,06	6L_d8-1	88179	0
6L_a8-2	88179	0	6L_b8-2	88781	1,17	6L_c8-2	88366	14,85	6L_d8-2	88179	0
6L_a8-3	88179	0	6L_b8-3	88781	0	6L_c8-3	87756	19,55	6L_d8-3	88179	0
6L_a8-4	88179	0	6L_b8-4	88167	0,49	6L_c8-4	87756	17,64	6L_d8-4	88179	13,37
6L_a8-5	88179	0	6L_b8-5	88167	0,66	6L_c8-5	87756	21,51	6L_d8-5	88179	0
6L_a9-1	88179	0	6L_b9-1	88781	0	6L_c9-1	87457	26,27	6L_d9-1	88179	0
6L_a9-2	88179	0	6L_b9-2	88781	0	6L_c9-2	87457	12,03	6L_d9-2	88179	0
6L_a9-3	88179	0	6L_b9-3	88167	0	6L_c9-3	87457	12,28	6L_d9-3	88179	0
6L_a9-4	88179	0	6L_b9-4	89398	0	6L_c9-4	87457	21,75	6L_d9-4	88179	0
6L_a9-5	88179	0	6L_b9-5	89398	0	6L_c9-5	87457	18,05	6L_d9-5	88179	0
6L_a10-1	88179	0,76	6L_b10-1	89398	0	6L_c10-1	88366	18,76	6L_d10-1	88179	0,65
6L_a10-2	88179	0	6L_b10-2	88167	2,16	6L_c10-2	88366	21,91	6L_d10-2	88179	3,7
6L_a10-3	88179	0	6L_b10-3	88781	0,69	6L_c10-3	88366	14,19	6L_d10-3	88179	0
6L_a10-4	88179	1,14	6L_b10-4	89398	0	6L_c10-4	88366	14,75	6L_d10-4	88179	0,83
6L_a10-5	88179	0,22	6L_b10-5	89398	0	6L_c10-5	88366	20,6	6L_d10-5	88179	0

Tab. C2: Pilzbefall von *N. nucifera* im Spätsommer 2003

Entnahme am 25.08.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
1L_a1-1	88201	0	1L_b1-1	88201	0	1L_c1-1	88201	0	1L_d1-1	88201	0
1L_a1-2	88201	0	1L_b1-2	88201	0	1L_c1-2	88201	0	1L_d1-2	88201	0
1L_a1-3	88201	0	1L_b1-3	88201	0	1L_c1-3	88201	0	1L_d1-3	88201	0
1L_a1-4	88201	0	1L_b1-4	88201	0	1L_c1-4	88201	0	1L_d1-4	88201	0
1L_a1-5	88201	0	1L_b1-5	88201	0	1L_c1-5	88201	0	1L_d1-5	88201	0
1L_a2-1	88201	0	1L_b2-1	88201	0	1L_c2-1	88201	0,4	1L_d2-1	88201	0
1L_a2-2	88201	0	1L_b2-2	88201	0	1L_c2-2	88201	0	1L_d2-2	88201	0
1L_a2-3	88201	0	1L_b2-3	88201	0	1L_c2-3	88201	1,17	1L_d2-3	88201	0
1L_a2-4	88201	0	1L_b2-4	88201	0	1L_c2-4	88201	1,08	1L_d2-4	88201	0
1L_a2-5	88201	0	1L_b2-5	88201	0	1L_c2-5	88201	2,24	1L_d2-5	88201	0
1L_a3-1	88201	0	1L_b3-1	88201	0	1L_c3-1	88201	0	1L_d3-1	88201	0
1L_a3-2	88201	0	1L_b3-2	88201	0	1L_c3-2	88201	0	1L_d3-2	88201	0
1L_a3-3	88201	0	1L_b3-3	88201	0	1L_c3-3	88201	0	1L_d3-3	88201	0
1L_a3-4	88201	0	1L_b3-4	88201	0	1L_c3-4	88201	1,26	1L_d3-4	88201	0
1L_a3-5	88201	0	1L_b3-5	88201	0	1L_c3-5	88201	0,88	1L_d3-5	88201	0
1L_a4-1	88201	0	1L_b4-1	88201	0	1L_c4-1	88201	0,44	1L_d4-1	88201	0
1L_a4-2	88201	0	1L_b4-2	88201	0	1L_c4-2	88201	0	1L_d4-2	88201	0
1L_a4-3	88201	0	1L_b4-3	88201	0	1L_c4-3	88201	0	1L_d4-3	88201	0
1L_a4-4	88201	0	1L_b4-4	88201	0	1L_c4-4	88201	0	1L_d4-4	88201	0
1L_a4-5	88201	0	1L_b4-5	88201	0	1L_c4-5	88201	0	1L_d4-5	88201	0
1L_a5-1	88201	0	1L_b5-1	88201	0	1L_c5-1	88201	0	1L_d5-1	88201	0
1L_a5-2	88201	0	1L_b5-2	88201	0	1L_c5-2	88201	0	1L_d5-2	88201	0
1L_a5-3	88201	0	1L_b5-3	88201	0	1L_c5-3	88201	0	1L_d5-3	88201	0
1L_a5-4	88201	0	1L_b5-4	88201	0	1L_c5-4	88201	0	1L_d5-4	88201	0
1L_a5-5	88201	0	1L_b5-5	88201	0	1L_c5-5	88201	0	1L_d5-5	88201	0
1L_a6-1	88201	0	1L_b6-1	88201	0	1L_c6-1	88201	0	1L_d6-1	88201	0
1L_a6-2	88201	0	1L_b6-2	88201	0	1L_c6-2	88201	0	1L_d6-2	88201	0
1L_a6-3	88201	0	1L_b6-3	88201	0	1L_c6-3	88201	0,42	1L_d6-3	88201	0
1L_a6-4	88201	0	1L_b6-4	88201	0	1L_c6-4	88201	0	1L_d6-4	88201	0
1L_a6-5	88201	0	1L_b6-5	88201	0	1L_c6-5	88201	0	1L_d6-5	88201	0
1L_a7-1	88201	0	1L_b7-1	88201	0	1L_c7-1	88201	0	1L_d7-1	88201	0
1L_a7-2	88201	0	1L_b7-2	88201	0	1L_c7-2	88201	0,52	1L_d7-2	88201	0
1L_a7-3	88201	0	1L_b7-3	88201	0	1L_c7-3	88201	0	1L_d7-3	88201	0
1L_a7-4	88201	0	1L_b7-4	88201	0	1L_c7-4	88201	0,8	1L_d7-4	88201	0
1L_a7-5	88201	0	1L_b7-5	88201	0	1L_c7-5	88201	0	1L_d7-5	88201	0
1L_a8-1	88201	0	1L_b8-1		-	1L_c8-1	88201	0,72	1L_d8-1	88201	0
1L_a8-2	88201	0	1L_b8-2		-	1L_c8-2	88201	0	1L_d8-2	88201	0
1L_a8-3	88201	0	1L_b8-3		-	1L_c8-3	88201	0	1L_d8-3	88201	0
1L_a8-4	88201	0	1L_b8-4		-	1L_c8-4	88201	0	1L_d8-4	88201	0
1L_a8-5	88201	0	1L_b8-5		-	1L_c8-5	88201	0,37	1L_d8-5	88201	0
1L_a9-1	88201	0	1L_b9-1	88201	0	1L_c9-1	88201	0	1L_d9-1	88201	0
1L_a9-2	88201	0	1L_b9-2	88201	0	1L_c9-2	88201	0	1L_d9-2	88201	0
1L_a9-3	88201	0	1L_b9-3	88201	0	1L_c9-3	88201	0	1L_d9-3	88201	0
1L_a9-4	88201	0	1L_b9-4	88201	0	1L_c9-4	88201	3,51	1L_d9-4	88201	0
1L_a9-5	88201	0	1L_b9-5	88201	0	1L_c9-5	88201	0,44	1L_d9-5	88201	0
1L_a10-1	88201	0	1L_b10-1	88201	0	1L_c10-1	88201	0,29	1L_d10-1	88201	0
1L_a10-2	88201	0	1L_b10-2	88201	0	1L_c10-2	88201	0,28	1L_d10-2	88201	0
1L_a10-3	88201	0	1L_b10-3	88201	0	1L_c10-3	88201	0	1L_d10-3	88201	0
1L_a10-4	88201	0	1L_b10-4	88201	0	1L_c10-4	88201	0	1L_d10-4	88201	0
1L_a10-5	88201	0	1L_b10-5	88201	0	1L_c10-5	88201	0	1L_d10-5	88201	0

Fortsetzung Tab. C2:

Entnahme am 01.09.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
2L_a1-1	88188	0	2L_b1-1	88187	0	2L_c1-1	88153	0,38	2L_d1-1	88188	0
2L_a1-2	88188	0	2L_b1-2	88187	0	2L_c1-2	88153	0	2L_d1-2	88188	0
2L_a1-3	88188	0,9	2L_b1-3	88187	0	2L_c1-3	88153	0	2L_d1-3	88188	0
2L_a1-4	88188	0,34	2L_b1-4	88188	0	2L_c1-4	88153	0	2L_d1-4	88188	0
2L_a1-5	88188	0	2L_b1-5	88188	0	2L_c1-5	88153	0	2L_d1-5	88187	0
2L_a2-1	88188	0	2L_b2-1	88188	0	2L_c2-1	88153	0,49	2L_d2-1	88187	0
2L_a2-2	88187	0	2L_b2-2	88188	0	2L_c2-2	88153	0	2L_d2-2	88187	0
2L_a2-3	88187	0	2L_b2-3	88188	1,51	2L_c2-3	88153	0	2L_d2-3	88187	0
2L_a2-4	88187	0	2L_b2-4	88188	3,63	2L_c2-4	88153	0,39	2L_d2-4	88187	0
2L_a2-5	88187	0	2L_b2-5	88188	0	2L_c2-5	88153	0	2L_d2-5	88188	0
2L_a3-1	88187	0	2L_b3-1	88188	0	2L_c3-1	88153	0	2L_d3-1	88187	0
2L_a3-2	88187	0	2L_b3-2	88188	0	2L_c3-2	88153	0	2L_d3-2	88187	0
2L_a3-3	88187	0	2L_b3-3	88188	0	2L_c3-3	88153	0	2L_d3-3	88188	0
2L_a3-4	88187	0	2L_b3-4	88188	0	2L_c3-4	88153	0	2L_d3-4	88188	0
2L_a3-5	88187	0	2L_b3-5	88188	0	2L_c3-5	88153	0	2L_d3-5	88187	0
2L_a4-1	88187	0	2L_b4-1	88188	0	2L_c4-1	88153	0	2L_d4-1	88187	0
2L_a4-2	88187	0,62	2L_b4-2	88188	0	2L_c4-2	88153	0	2L_d4-2	88187	0
2L_a4-3	88187	0	2L_b4-3	88188	0	2L_c4-3	88153	0	2L_d4-3	88188	0
2L_a4-4	88187	0	2L_b4-4	88188	0	2L_c4-4	88153	0	2L_d4-4	88188	0
2L_a4-5	88187	0	2L_b4-5	88188	0	2L_c4-5	88153	0	2L_d4-5	88188	0
2L_a5-1	88187	0	2L_b5-1	88187	0	2L_c5-1	88153	0	2L_d5-1	88187	0
2L_a5-2	88187	0	2L_b5-2	88187	0	2L_c5-2	88153	0	2L_d5-2	88188	0
2L_a5-3	88187	0	2L_b5-3	88187	0	2L_c5-3	88153	0	2L_d5-3	88187	0
2L_a5-4	88187	0	2L_b5-4	88187	0	2L_c5-4	88153	0,19	2L_d5-4	88187	0
2L_a5-5	88187	0,57	2L_b5-5	88187	0	2L_c5-5	88153	0	2L_d5-5	88187	0
2L_a6-1	88187	0	2L_b6-1	88187	0	2L_c6-1	88153	0	2L_d6-1	88187	0
2L_a6-2	88187	0,33	2L_b6-2	88187	0	2L_c6-2	88153	0	2L_d6-2	88187	0,23
2L_a6-3	88187	0	2L_b6-3	88187	0	2L_c6-3	88153	0	2L_d6-3	88187	0
2L_a6-4	88187	0	2L_b6-4	88188	0	2L_c6-4	88153	0	2L_d6-4	88187	0
2L_a6-5	88187	0	2L_b6-5	88188	0	2L_c6-5	88153	0,34	2L_d6-5	88187	0
2L_a7-1	88187	0	2L_b7-1	88188	0	2L_c7-1	88153	1,18	2L_d7-1	88187	0
2L_a7-2	88187	0	2L_b7-2	88188	0	2L_c7-2	88153	0,85	2L_d7-2	88187	0
2L_a7-3	88187	0	2L_b7-3	88188	0	2L_c7-3	88153	0,45	2L_d7-3	88187	0
2L_a7-4	88187	0	2L_b7-4	88188	0	2L_c7-4	88153	0,78	2L_d7-4	88187	0
2L_a7-5	88187	0	2L_b7-5	88188	2,32	2L_c7-5	88153	0	2L_d7-5	88187	0
2L_a8-1	88187	0	2L_b8-1	88188	0	2L_c8-1	88153	0	2L_d8-1	88187	0
2L_a8-2	88187	0	2L_b8-2	88188	0	2L_c8-2	88153	0	2L_d8-2	88187	0
2L_a8-3	88187	0	2L_b8-3	88188	0	2L_c8-3	88153	0	2L_d8-3	88187	0
2L_a8-4	88187	0	2L_b8-4	88188	0	2L_c8-4	88153	0,51	2L_d8-4	88187	0
2L_a8-5	88187	0	2L_b8-5	88188	0	2L_c8-5	88153	0,8	2L_d8-5	88187	0
2L_a9-1	88187	0,1	2L_b9-1	88188	0	2L_c9-1	88153	0	2L_d9-1	88187	0
2L_a9-2	88187	0	2L_b9-2	88188	0	2L_c9-2	88153	0	2L_d9-2	88187	0
2L_a9-3	88187	0	2L_b9-3	88188	0	2L_c9-3	88153	1,17	2L_d9-3	88187	0
2L_a9-4	88187	0	2L_b9-4	88188	0	2L_c9-4	88153	0	2L_d9-4	88187	0
2L_a9-5	88187	0,4	2L_b9-5	88188	0	2L_c9-5	88153	0	2L_d9-5	88187	0
2L_a10-1	88187	0,27	2L_b10-1	88188	0	2L_c10-1	88153	0	2L_d10-1	88187	0
2L_a10-2	88187	0	2L_b10-2	88188	0	2L_c10-2	88153	0	2L_d10-2	88188	0
2L_a10-3	88187	0	2L_b10-3	88188	0	2L_c10-3	88153	0,47	2L_d10-3	88187	0
2L_a10-4	88187	0	2L_b10-4	88188	4,24	2L_c10-4	88153	0	2L_d10-4	88188	0
2L_a10-5	88187	0	2L_b10-5	88188	0	2L_c10-5	88153	0	2L_d10-5	88188	0

Fortsetzung Tab. C2:

Entnahme am 08.09.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
3L_a1-1	88025	0	3L_b1-1	88026	0	3L_c1-1	88275	0	3L_d1-1	88275	0
3L_a1-2	88025	0,49	3L_b1-2	88026	0	3L_c1-2	88275	0	3L_d1-2	88275	0
3L_a1-3	88025	0	3L_b1-3	88026	0	3L_c1-3	88275	0	3L_d1-3	88275	0
3L_a1-4	88025	0	3L_b1-4	88026	0	3L_c1-4	88275	0	3L_d1-4	88275	0
3L_a1-5	88025	0	3L_b1-5	88025	0	3L_c1-5	88275	0	3L_d1-5	88275	0
3L_a2-1	88025	0	3L_b2-1	88026	0	3L_c2-1	88275	0,89	3L_d2-1	88275	0
3L_a2-2	88025	0	3L_b2-2	88026	0,46	3L_c2-2	88275	0	3L_d2-2	88275	0
3L_a2-3	88025	0	3L_b2-3	88026	0	3L_c2-3	88275	0,34	3L_d2-3	88275	0
3L_a2-4	88025	1,31	3L_b2-4	88026	0	3L_c2-4	88275	0	3L_d2-4	88275	0
3L_a2-5	88025	0	3L_b2-5	88026	0	3L_c2-5	88275	0	3L_d2-5	88275	0
3L_a3-1	88025	0,12	3L_b3-1	88026	0,38	3L_c3-1	88275	0	3L_d3-1	88275	0
3L_a3-2	88025	0,16	3L_b3-2	88026	0	3L_c3-2	88275	0	3L_d3-2	88275	0
3L_a3-3	88025	0	3L_b3-3	88026	0	3L_c3-3	88275	0	3L_d3-3	88275	0
3L_a3-4	88025	0	3L_b3-4	88026	0	3L_c3-4	88275	1,01	3L_d3-4	88275	0
3L_a3-5	88025	0	3L_b3-5	88026	0	3L_c3-5	88275	0,2	3L_d3-5	88275	0
3L_a4-1	88025	1,24	3L_b4-1	88026	0	3L_c4-1	88275	0,44	3L_d4-1	88275	0
3L_a4-2	88025	0	3L_b4-2	88026	0	3L_c4-2	88275	1,64	3L_d4-2	88275	0
3L_a4-3	88025	1,12	3L_b4-3	88026	0	3L_c4-3	88275	0,15	3L_d4-3	88275	0
3L_a4-4	88025	0	3L_b4-4	88026	0	3L_c4-4	88275	0	3L_d4-4	88275	0
3L_a4-5	88025	0	3L_b4-5	88026	0	3L_c4-5	88275	0,44	3L_d4-5	88275	0
3L_a5-1	88025	1,15	3L_b5-1	88026	0	3L_c5-1	88275	0	3L_d5-1	88275	0
3L_a5-2	88025	0	3L_b5-2	88026	11,1	3L_c5-2	88275	0	3L_d5-2	88275	0
3L_a5-3	88025	0	3L_b5-3	88026	0	3L_c5-3	88275	0	3L_d5-3	88275	0
3L_a5-4	88025	0	3L_b5-4	88026	0	3L_c5-4	88275	0,24	3L_d5-4	88275	0
3L_a5-5	88025	0	3L_b5-5	88026	0,48	3L_c5-5	88275	0,25	3L_d5-5	88275	0
3L_a6-1	88025	0	3L_b6-1	88026	0	3L_c6-1	88275	0,28	3L_d6-1	88275	0
3L_a6-2	88025	0	3L_b6-2	88026	0	3L_c6-2	88275	0,39	3L_d6-2	88275	0
3L_a6-3	88025	0	3L_b6-3	88026	0	3L_c6-3	88275	6,07	3L_d6-3	88275	0
3L_a6-4	88025	0	3L_b6-4	88026	0,3	3L_c6-4	88275	0	3L_d6-4	88275	0
3L_a6-5	88025	0	3L_b6-5	88026	0,43	3L_c6-5	88275	0	3L_d6-5	88275	0
3L_a7-1	88025	0	3L_b7-1	88026	0	3L_c7-1	88275	0	3L_d7-1	88275	0
3L_a7-2	88025	0	3L_b7-2	88026	0	3L_c7-2	88275	0	3L_d7-2	88275	0
3L_a7-3	88025	0	3L_b7-3	88026	0,21	3L_c7-3	88275	0	3L_d7-3	88275	0
3L_a7-4	88025	0	3L_b7-4	88026	0	3L_c7-4	88275	0	3L_d7-4	88275	0
3L_a7-5	88025	0,31	3L_b7-5	88026	0	3L_c7-5	88275	0,44	3L_d7-5	88275	0
3L_a8-1	88025	0	3L_b8-1	88026	0	3L_c8-1	88275	0	3L_d8-1	88275	0
3L_a8-2	88025	0	3L_b8-2	88026	0	3L_c8-2	88275	0	3L_d8-2	88275	0
3L_a8-3	88025	0	3L_b8-3	88026	0	3L_c8-3	88275	0	3L_d8-3	88275	0
3L_a8-4	88025	0	3L_b8-4	88026	0	3L_c8-4	88275	0	3L_d8-4	88275	0
3L_a8-5	88025	0	3L_b8-5	88026	0	3L_c8-5	88275	0	3L_d8-5	88275	0
3L_a9-1	88025	0	3L_b9-1	88026	0	3L_c9-1	88275	0,22	3L_d9-1	88275	0
3L_a9-2	88025	0	3L_b9-2	88026	7,4	3L_c9-2	88275	0	3L_d9-2	88275	0
3L_a9-3	88025	0,67	3L_b9-3	88026	28,85	3L_c9-3	88275	0	3L_d9-3	88275	0
3L_a9-4	88025	0	3L_b9-4	88026	16,95	3L_c9-4	88275	0,63	3L_d9-4	88275	0
3L_a9-5	88025	0	3L_b9-5	88026	4,46	3L_c9-5	88275	0,36	3L_d9-5	88275	0
3L_a10-1	88025	0	3L_b10-1		-	3L_c10-1	88275	0,36	3L_d10-1	88275	0
3L_a10-2	88025	0	3L_b10-2		-	3L_c10-2	88275	3,86	3L_d10-2	88275	0
3L_a10-3	88025	0	3L_b10-3		-	3L_c10-3	88275	0,3	3L_d10-3	88275	0
3L_a10-4	88025	0	3L_b10-4		-	3L_c10-4	88275	0	3L_d10-4	88275	0
3L_a10-5	88025	0	3L_b10-5		-	3L_c10-5	88275	0	3L_d10-5	88275	0

Fortsetzung Tab. C2:

Entnahme am 15.09.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
4L_a1-1	88000	6,03	4L_b1-1	88051	0	4L_c1-1	88051	0,3	4L_d1-1	88051	0
4L_a1-2	87392	0,43	4L_b1-2	88051	0	4L_c1-2	88051	1,34	4L_d1-2	88051	0
4L_a1-3	87392	4,1	4L_b1-3	88051	0	4L_c1-3	88051	0	4L_d1-3	88051	0
4L_a1-4	87392	0	4L_b1-4	88051	0	4L_c1-4	88051	0	4L_d1-4	88051	0
4L_a1-5	87392	3,99	4L_b1-5	88051	0	4L_c1-5	88051	0	4L_d1-5	88051	0
4L_a2-1	87392	0	4L_b2-1	88051	0	4L_c2-1	88051	0,58	4L_d2-1	88051	0
4L_a2-2	87392	0,29	4L_b2-2	88051	0	4L_c2-2	88051	0	4L_d2-2	88051	0
4L_a2-3	87392	0	4L_b2-3	88051	0	4L_c2-3	88051	0	4L_d2-3	88051	0
4L_a2-4	87392	0	4L_b2-4	88051	0	4L_c2-4	88051	0	4L_d2-4	88051	0
4L_a2-5	87392	0	4L_b2-5	88051	0	4L_c2-5	88051	0	4L_d2-5	88051	0
4L_a3-1	87392	0	4L_b3-1	88051	0	4L_c3-1	88051	0	4L_d3-1	88051	0
4L_a3-2	87392	0	4L_b3-2	88051	0	4L_c3-2	88051	0	4L_d3-2	88051	0
4L_a3-3	87392	0,63	4L_b3-3	88051	0	4L_c3-3	88051	0	4L_d3-3	88051	0
4L_a3-4	87392	0	4L_b3-4	88051	0	4L_c3-4	88051	0	4L_d3-4	88051	0
4L_a3-5	87392	0,29	4L_b3-5	88051	0	4L_c3-5	88051	0	4L_d3-5	88051	0
4L_a4-1	87392	0	4L_b4-1	88051	0	4L_c4-1	88051	1,42	4L_d4-1	88051	0
4L_a4-2	87392	0	4L_b4-2	88051	0	4L_c4-2	88051	6,31	4L_d4-2	88051	0
4L_a4-3	87392	0	4L_b4-3	88051	0	4L_c4-3	88051	40,14	4L_d4-3	88051	0
4L_a4-4	87392	0	4L_b4-4	88051	0	4L_c4-4	88051	4,23	4L_d4-4	88051	0
4L_a4-5	87392	0,69	4L_b4-5	88051	0	4L_c4-5	88051	0,2	4L_d4-5	88051	0
4L_a5-1	87392	12,16	4L_b5-1	88051	0	4L_c5-1	88051	0	4L_d5-1	88051	0,26
4L_a5-2	87392	0	4L_b5-2	88051	0	4L_c5-2	88051	0	4L_d5-2	88051	0
4L_a5-3	87392	2,38	4L_b5-3	88051	0	4L_c5-3	88051	0,34	4L_d5-3	88051	0
4L_a5-4	87392	1,47	4L_b5-4	88051	0	4L_c5-4	88051	0,25	4L_d5-4	88051	1,12
4L_a5-5	87392	0	4L_b5-5	88051	0	4L_c5-5	88051	0	4L_d5-5	88051	16,57
4L_a6-1	87392	6,6	4L_b6-1	88051	0	4L_c6-1	88051	0,88	4L_d6-1	88051	0
4L_a6-2	87392	1,46	4L_b6-2	88051	0	4L_c6-2	88051	0,44	4L_d6-2	88051	0
4L_a6-3	87392	11,87	4L_b6-3	88051	0	4L_c6-3	88051	0	4L_d6-3	88051	0
4L_a6-4	87392	0	4L_b6-4	88051	0	4L_c6-4	88051	0,47	4L_d6-4	88051	0
4L_a6-5	87392	4,36	4L_b6-5	88051	0,19	4L_c6-5	88051	0,51	4L_d6-5	88051	0
4L_a7-1	87392	0,28	4L_b7-1	88051	0	4L_c7-1	88051	0	4L_d7-1	88051	0
4L_a7-2	87392	0	4L_b7-2	88051	5,26	4L_c7-2	88051	0	4L_d7-2	88051	0
4L_a7-3	87392	0	4L_b7-3	88051	0	4L_c7-3	88051	0	4L_d7-3	88051	0
4L_a7-4	87392	0	4L_b7-4	88051	0	4L_c7-4	88051	0,2	4L_d7-4	88051	0
4L_a7-5	87392	0,37	4L_b7-5	88051	1,09	4L_c7-5	88051	0,27	4L_d7-5	88051	0
4L_a8-1	87392	0	4L_b8-1	88051	0	4L_c8-1	88051	0	4L_d8-1	88051	0
4L_a8-2	87392	1,36	4L_b8-2	88051	0	4L_c8-2	88051	0,39	4L_d8-2	88051	0
4L_a8-3	87392	0,29	4L_b8-3	88051	0	4L_c8-3	88051	0	4L_d8-3	88051	0
4L_a8-4	87392	0	4L_b8-4	88051	0	4L_c8-4	88051	0	4L_d8-4	88051	0
4L_a8-5	87392	0	4L_b8-5	88051	0	4L_c8-5	88051	0	4L_d8-5	88051	0
4L_a9-1	87392	0	4L_b9-1	88051	0	4L_c9-1	88051	0	4L_d9-1	88051	0
4L_a9-2	87392	0,77	4L_b9-2	88051	0	4L_c9-2	88051	0	4L_d9-2	88051	0
4L_a9-3	87392	0	4L_b9-3	88051	0	4L_c9-3	88051	0	4L_d9-3	88051	0
4L_a9-4	87392	0,74	4L_b9-4	88051	0	4L_c9-4	88051	0	4L_d9-4	88051	0
4L_a9-5	87392	0	4L_b9-5	88051	0	4L_c9-5	88051	0	4L_d9-5	88051	0
4L_a10-1	87392	0	4L_b10-1	88051	2,9	4L_c10-1	88051	0,78	4L_d10-1	88051	0
4L_a10-2	87392	0	4L_b10-2	88051	21,7	4L_c10-2	88051	0	4L_d10-2	88051	0
4L_a10-3	87392	0	4L_b10-3	88051	4,53	4L_c10-3	88051	0,53	4L_d10-3	88051	0
4L_a10-4	88188	0,18	4L_b10-4	88051	0	4L_c10-4	88051	1,9	4L_d10-4	88051	0
4L_a10-5	88188	0	4L_b10-5	88051	0	4L_c10-5	88051	6,75	4L_d10-5	88051	0,29

Fortsetzung Tab. C2:

Entnahme am 22.09.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
5L_a1-1	88082	5,65	5L_b1-1	88082	0	5L_c1-1	88082	2,66	5L_d1-1	88082	0
5L_a1-2	88082	38,08	5L_b1-2	88082	0	5L_c1-2	88082	0,43	5L_d1-2	88082	0
5L_a1-3	88082	10,26	5L_b1-3	88082	0	5L_c1-3	88082	0,31	5L_d1-3	88082	0
5L_a1-4	88082	2	5L_b1-4	88082	0	5L_c1-4	88082	0	5L_d1-4	88082	0
5L_a1-5	88082	2,23	5L_b1-5	88082	0,6	5L_c1-5	88082	0	5L_d1-5	88082	0
5L_a2-1	88082	2,72	5L_b2-1	88082	0	5L_c2-1	88082	3,4	5L_d2-1	88082	0,2
5L_a2-2	88082	9,62	5L_b2-2	88082	0	5L_c2-2	88082	0,93	5L_d2-2	88082	0
5L_a2-3	88082	1	5L_b2-3	88082	1,46	5L_c2-3	88082	2,2	5L_d2-3	88082	0
5L_a2-4	88082	0,42	5L_b2-4	88082	0,58	5L_c2-4	88082	32,47	5L_d2-4	88082	0
5L_a2-5	88082	0	5L_b2-5	88082	0	5L_c2-5	88082	15,38	5L_d2-5	88082	0
5L_a3-1	88082	4,65	5L_b3-1	88082	16,83	5L_c3-1	88082	29,31	5L_d3-1	88082	0
5L_a3-2	88082	17,12	5L_b3-2	88082	29,83	5L_c3-2	88082	26,16	5L_d3-2	88082	0
5L_a3-3	88082	35,24	5L_b3-3	88082	0,27	5L_c3-3	88082	38,21	5L_d3-3	88082	0
5L_a3-4	88082	22,63	5L_b3-4	88082	0,55	5L_c3-4	88082	6,93	5L_d3-4	88082	0
5L_a3-5	88082	26,9	5L_b3-5	88082	8,82	5L_c3-5	88082	6,13	5L_d3-5	88082	0
5L_a4-1	88082	31,63	5L_b4-1	88082	32,95	5L_c4-1	88082	0,23	5L_d4-1	88082	0
5L_a4-2	88082	36,11	5L_b4-2	88082	13,19	5L_c4-2	88082	0,46	5L_d4-2	88082	0
5L_a4-3	88082	38,32	5L_b4-3	88082	6,27	5L_c4-3	88082	0	5L_d4-3	88082	0
5L_a4-4	88082	30,2	5L_b4-4	88082	46,6	5L_c4-4	88082	0	5L_d4-4	88082	0
5L_a4-5	88082	31,5	5L_b4-5	88082	33,62	5L_c4-5	88082	0	5L_d4-5	88082	0
5L_a5-1	88082	5,19	5L_b5-1	88082	37,1	5L_c5-1	88082	0	5L_d5-1	88082	0
5L_a5-2	88082	0,91	5L_b5-2	88082	31,8	5L_c5-2	88082	0,53	5L_d5-2	88082	0
5L_a5-3	88082	9,26	5L_b5-3	88082	26,64	5L_c5-3	88082	0	5L_d5-3	88082	0
5L_a5-4	88082	3,93	5L_b5-4	88082	38,01	5L_c5-4	88082	0	5L_d5-4	88082	0
5L_a5-5	88082	5,1	5L_b5-5	88082	43,65	5L_c5-5	88082	1,34	5L_d5-5	88082	0
5L_a6-1	88082	18,39	5L_b6-1	88082	0	5L_c6-1	88082	0	5L_d6-1	88082	0
5L_a6-2	88082	11,3	5L_b6-2	88082	0	5L_c6-2	88082	0	5L_d6-2	88082	0
5L_a6-3	88082	9,22	5L_b6-3	88082	0	5L_c6-3	88082	0,21	5L_d6-3	88082	0
5L_a6-4	88082	1,38	5L_b6-4	88082	0	5L_c6-4	88082	0,2	5L_d6-4	88082	0
5L_a6-5	88082	2,42	5L_b6-5	88082	0	5L_c6-5	88082	0	5L_d6-5	88082	0
5L_a7-1	88082	0	5L_b7-1	88082	0	5L_c7-1	88082	30,35	5L_d7-1	88082	0
5L_a7-2	88082	0	5L_b7-2	88082	0	5L_c7-2	88082	35,42	5L_d7-2	88082	0
5L_a7-3	88082	1,76	5L_b7-3	88082	0	5L_c7-3	88082	24,58	5L_d7-3	88082	0
5L_a7-4	88082	0	5L_b7-4	88082	0	5L_c7-4	88082	14,42	5L_d7-4	88082	0
5L_a7-5	88082	0	5L_b7-5	88082	0	5L_c7-5	88082	26,81	5L_d7-5	88082	0
5L_a8-1	88082	0,27	5L_b8-1	88082	0	5L_c8-1	88082	0,25	5L_d8-1	88082	8,17
5L_a8-2	88082	40,63	5L_b8-2	88082	0	5L_c8-2	88082	0	5L_d8-2	88082	37,56
5L_a8-3	88082	22,38	5L_b8-3	88082	0	5L_c8-3	88082	0	5L_d8-3	88082	2,34
5L_a8-4	88082	5,77	5L_b8-4	88082	0	5L_c8-4	88082	0,3	5L_d8-4	88082	0
5L_a8-5	88082	47,48	5L_b8-5	88082	0	5L_c8-5	88082	0	5L_d8-5	88082	0,8
5L_a9-1	88082	0	5L_b9-1	88082	33,09	5L_c9-1	88082	0,29	5L_d9-1	88082	0
5L_a9-2	88082	0	5L_b9-2	88082	27,74	5L_c9-2	88082	0,42	5L_d9-2	88082	0
5L_a9-3	88082	1,41	5L_b9-3	88082	9,6	5L_c9-3	88082	1,38	5L_d9-3	88082	0,61
5L_a9-4	88082	0,17	5L_b9-4	88082	2,03	5L_c9-4	88082	0	5L_d9-4	88082	0
5L_a9-5	88082	0,3	5L_b9-5	88082	22,2	5L_c9-5	88082	1,32	5L_d9-5	88082	0
5L_a10-1	88082	4,75	5L_b10-1	88082	0	5L_c10-1	88082	0	5L_d10-1	88082	0
5L_a10-2	88082	19,99	5L_b10-2	88082	0	5L_c10-2	88082	0,18	5L_d10-2	88082	0
5L_a10-3	88082	29,67	5L_b10-3	88082	0	5L_c10-3	88082	0	5L_d10-3	88082	0
5L_a10-4	88082	0	5L_b10-4	88082	0	5L_c10-4	88082	0	5L_d10-4	88082	0
5L_a10-5	88082	7,55	5L_b10-5	88082	0	5L_c10-5	88082	0,71	5L_d10-5	88082	0

Fortsetzung Tab. C2:

Entnahme am 29.09.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
6L_a1-1	88004	29,31	6L_b1-1	88004	0	6L_c1-1	88004	0,67	6L_d1-1	88004	0
6L_a1-2	88004	11,38	6L_b1-2	88004	0	6L_c1-2	88004	0	6L_d1-2	88004	0
6L_a1-3	88004	22,21	6L_b1-3	88004	0	6L_c1-3	88004	1,17	6L_d1-3	88004	0
6L_a1-4	88004	21,81	6L_b1-4	88004	0	6L_c1-4	88004	0	6L_d1-4	88004	0
6L_a1-5	88004	36,16	6L_b1-5	88004	0	6L_c1-5	88004	0	6L_d1-5	88004	0
6L_a2-1	88004	3,38	6L_b2-1	88004	0	6L_c2-1	88004	1,2	6L_d2-1	88004	0
6L_a2-2	88004	0	6L_b2-2	88004	0	6L_c2-2	88004	2,76	6L_d2-2	88004	0
6L_a2-3	88004	31,26	6L_b2-3	88004	0,52	6L_c2-3	88004	1,16	6L_d2-3	88004	0
6L_a2-4	88004	0,08	6L_b2-4	88004	3,81	6L_c2-4	88004	0	6L_d2-4	88004	0
6L_a2-5	88004	0	6L_b2-5	88004	1,1	6L_c2-5	88004	1,84	6L_d2-5	88004	0
6L_a3-1	88004	27,84	6L_b3-1	88004	0	6L_c3-1	88004	0,33	6L_d3-1	88004	26,57
6L_a3-2	88004	25,66	6L_b3-2	88004	0	6L_c3-2	88004	0,45	6L_d3-2	88004	0
6L_a3-3	88004	31,79	6L_b3-3	88004	0	6L_c3-3	88004	0,79	6L_d3-3	88004	0
6L_a3-4	88004	31,77	6L_b3-4	88004	1,5	6L_c3-4	88004	0,3	6L_d3-4	88004	9,38
6L_a3-5	88004	40,42	6L_b3-5	88004	0,18	6L_c3-5	88004	0,34	6L_d3-5	88004	14,47
6L_a4-1	88004	8,5	6L_b4-1	88004	0	6L_c4-1	88004	2,21	6L_d4-1	88004	0
6L_a4-2	88004	2,17	6L_b4-2	88004	0,44	6L_c4-2	88004	36,45	6L_d4-2	88004	0
6L_a4-3	88004	5,47	6L_b4-3	88004	0,16	6L_c4-3	88004	20,44	6L_d4-3	88004	0
6L_a4-4	88004	9,54	6L_b4-4	88004	0	6L_c4-4	88004	10,34	6L_d4-4	88004	0
6L_a4-5	88004	2,72	6L_b4-5	88004	0	6L_c4-5	88004	0,21	6L_d4-5	88004	0
6L_a5-1	88004	40,57	6L_b5-1	88004	20,11	6L_c5-1	88004	0,18	6L_d5-1	88004	0
6L_a5-2	88004	30,64	6L_b5-2	88004	16,38	6L_c5-2	88004	0,39	6L_d5-2	88004	0
6L_a5-3	88004	32,19	6L_b5-3	88004	17,86	6L_c5-3	88004	0	6L_d5-3	88004	0
6L_a5-4	88004	43,42	6L_b5-4	88004	5,2	6L_c5-4	88004	0	6L_d5-4	88004	0
6L_a5-5	88004	34,31	6L_b5-5	88004	12,36	6L_c5-5	88004	0,4	6L_d5-5	88004	0
6L_a6-1	88004	4,61	6L_b6-1	88004	0	6L_c6-1	88004	0	6L_d6-1	88004	0
6L_a6-2	88004	4,2	6L_b6-2	88004	0	6L_c6-2	88004	27,16	6L_d6-2	88004	0
6L_a6-3	88004	21,05	6L_b6-3	88004	0	6L_c6-3	88004	37,95	6L_d6-3	88004	0
6L_a6-4	88004	36,19	6L_b6-4	88004	0	6L_c6-4	88004	6,3	6L_d6-4	88004	0
6L_a6-5	88004	14,02	6L_b6-5	88004	0	6L_c6-5	88004	1,74	6L_d6-5	88004	0
6L_a7-1	88004	0,95	6L_b7-1	88004	14,36	6L_c7-1	88004	0	6L_d7-1	88004	0
6L_a7-2	88004	0	6L_b7-2	88004	13,26	6L_c7-2	88004	6,83	6L_d7-2	88004	0
6L_a7-3	88004	4,46	6L_b7-3	88004	9,98	6L_c7-3	88004	26,42	6L_d7-3	88004	0
6L_a7-4	88004	7,53	6L_b7-4	88004	18,36	6L_c7-4	88004	0	6L_d7-4	88004	0
6L_a7-5	88004	2,05	6L_b7-5	88004	18,35	6L_c7-5	88004	0	6L_d7-5	88004	0
6L_a8-1	88004	13,98	6L_b8-1	88004	2,68	6L_c8-1	88004	0,99	6L_d8-1	88004	0
6L_a8-2	88004	0,46	6L_b8-2	88004	2,69	6L_c8-2	88004	0	6L_d8-2	88004	0
6L_a8-3	88004	1,52	6L_b8-3	88004	0	6L_c8-3	88004	0,4	6L_d8-3	88004	0
6L_a8-4	88004	22,07	6L_b8-4	88004	16,91	6L_c8-4	88004	0,66	6L_d8-4	88004	0
6L_a8-5	88004	19,1	6L_b8-5	88004	19,13	6L_c8-5	88004	0	6L_d8-5	88004	0
6L_a9-1	88004	37,67	6L_b9-1	88004	0	6L_c9-1	88004	35,82	6L_d9-1	88004	0
6L_a9-2	88004	19,89	6L_b9-2	88004	0	6L_c9-2	88004	44	6L_d9-2	88004	3,27
6L_a9-3	88004	21,72	6L_b9-3	88004	0	6L_c9-3	88004	39,5	6L_d9-3	88004	0
6L_a9-4	88004	15,8	6L_b9-4	88004	0	6L_c9-4	88004	32,11	6L_d9-4	88004	0
6L_a9-5	88004	19,01	6L_b9-5	88004	0	6L_c9-5	88004	25,06	6L_d9-5	88004	0
6L_a10-1	88004	0,76	6L_b10-1	88004	6,08	6L_c10-1	88004	14,7	6L_d10-1	88004	0
6L_a10-2	88004	5,5	6L_b10-2	88004	0,47	6L_c10-2	88004	18,8	6L_d10-2	88004	0
6L_a10-3	88004	0	6L_b10-3	88004	0,48	6L_c10-3	88004	28,21	6L_d10-3	88004	0
6L_a10-4	88004	0	6L_b10-4	88004	0	6L_c10-4	88004	0,48	6L_d10-4	88004	0
6L_a10-5	88004	0	6L_b10-5	88004	0	6L_c10-5	88004	0,2	6L_d10-5	88004	0

Fortsetzung Tab. C2:

Entnahme am 06.10.2003

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
7L_a1-1	88242	34,69	7L_b1-1	88095	0	7L_c1-1	88082	29,29	7L_d1-1	88082	0
7L_a1-2	88014	31,85	7L_b1-2	88095	0	7L_c1-2	88082	36,93	7L_d1-2	88082	0
7L_a1-3	88014	57,72	7L_b1-3	88095	0	7L_c1-3	88082	28,77	7L_d1-3	88082	0
7L_a1-4	88014	35	7L_b1-4	88095	0	7L_c1-4	88082	31,25	7L_d1-4	88082	0
7L_a1-5	88013	28,6	7L_b1-5	88095	0	7L_c1-5	88082	31,62	7L_d1-5	88082	0
7L_a2-1	88013	37,97	7L_b2-1	88095	15,44	7L_c2-1	88082	0	7L_d2-1	88082	43,46
7L_a2-2	88013	46,49	7L_b2-2	88095	24,33	7L_c2-2	88082	0,81	7L_d2-2	88082	37,82
7L_a2-3	88013	52,2	7L_b2-3	88095	44,15	7L_c2-3	88082	0	7L_d2-3	88082	12,95
7L_a2-4	88013	29,93	7L_b2-4	88095	37,39	7L_c2-4	88082	0	7L_d2-4	88082	13,48
7L_a2-5	88013	37,21	7L_b2-5	88095	32,81	7L_c2-5	88082	0,64	7L_d2-5	88082	37,88
7L_a3-1	88013	52,6	7L_b3-1	88095	1,39	7L_c3-1	88082	0,57	7L_d3-1	88082	0
7L_a3-2	88013	40,13	7L_b3-2	88095	13,42	7L_c3-2	88082	1,63	7L_d3-2	88082	0
7L_a3-3	88013	49,72	7L_b3-3	88095	0,39	7L_c3-3	88082	13,53	7L_d3-3	88082	0
7L_a3-4	88013	40,21	7L_b3-4	88095	16,96	7L_c3-4	88082	24,04	7L_d3-4	88082	0
7L_a3-5	88013	34,07	7L_b3-5	88095	0	7L_c3-5	88082	1,19	7L_d3-5	88082	0
7L_a4-1	88013	3,09	7L_b4-1	88095	2,09	7L_c4-1	88082	10,01	7L_d4-1	88082	0
7L_a4-2	88013	17,67	7L_b4-2	88095	5,63	7L_c4-2	88082	7,24	7L_d4-2	88082	0
7L_a4-3	88013	0	7L_b4-3	88095	5,57	7L_c4-3	88082	3,59	7L_d4-3	88082	0
7L_a4-4	88013	7,83	7L_b4-4	88095	0	7L_c4-4	88082	4,51	7L_d4-4	88082	0
7L_a4-5	88013	9,1	7L_b4-5	88095	0,53	7L_c4-5	88082	1,29	7L_d4-5	88082	0
7L_a5-1	88013	2,14	7L_b5-1	88095	0	7L_c5-1	88082	28,47	7L_d5-1	88082	0
7L_a5-2	88013	37,38	7L_b5-2	88095	2,28	7L_c5-2	88082	40,5	7L_d5-2	88082	0
7L_a5-3	88013	0	7L_b5-3	88095	9,86	7L_c5-3	88082	38,25	7L_d5-3	88082	0
7L_a5-4	88013	0	7L_b5-4	88095	0,16	7L_c5-4	88082	34,1	7L_d5-4	88082	0
7L_a5-5	88013	0,75	7L_b5-5	88095	0	7L_c5-5	88082	25,07	7L_d5-5	88082	0
7L_a6-1	88013	39,94	7L_b6-1	88095	27,12	7L_c6-1	88082	24,98	7L_d6-1	88082	0
7L_a6-2	88013	43,58	7L_b6-2	88095	25,53	7L_c6-2	88082	31,3	7L_d6-2	88082	0
7L_a6-3	88013	35,41	7L_b6-3	88095	30,4	7L_c6-3	88082	30,4	7L_d6-3	88082	0
7L_a6-4	88013	51,05	7L_b6-4	88095	13,1	7L_c6-4	88082	36,32	7L_d6-4	88082	0,28
7L_a6-5	88013	45,58	7L_b6-5	88095	21,92	7L_c6-5	88082	37,21	7L_d6-5	88082	0
7L_a7-1	88013	29,31	7L_b7-1	88095	0	7L_c7-1	88082	0,61	7L_d7-1	88082	0
7L_a7-2	88013	2,72	7L_b7-2	88095	0	7L_c7-2	88082	0,37	7L_d7-2	88082	0
7L_a7-3	88013	1,13	7L_b7-3	88095	0	7L_c7-3	88082	0	7L_d7-3	88082	0
7L_a7-4	88013	22,92	7L_b7-4	88095	0	7L_c7-4	88082	6,68	7L_d7-4	88082	10,96
7L_a7-5	88013	32,3	7L_b7-5	88095	0,42	7L_c7-5	88082	1,03	7L_d7-5	88082	0
7L_a8-1	88013	0,83	7L_b8-1	88095	0,23	7L_c8-1	88082	0,3	7L_d8-1	88082	0
7L_a8-2	88013	4,56	7L_b8-2	88095	0	7L_c8-2	88082	0	7L_d8-2	88082	0
7L_a8-3	88013	0,48	7L_b8-3	88095	0	7L_c8-3	88082	0,14	7L_d8-3	88082	0
7L_a8-4	88013	3,59	7L_b8-4	88095	0	7L_c8-4	88082	0	7L_d8-4	88082	0
7L_a8-5	88013	0,8	7L_b8-5	88095	0	7L_c8-5	88082	0,82	7L_d8-5	88082	0
7L_a9-1	88013	40,26	7L_b9-1	88095	32,18	7L_c9-1	88082	31,3	7L_d9-1	88082	0
7L_a9-2	88013	42,16	7L_b9-2	88095	25,62	7L_c9-2	88082	25,13	7L_d9-2	88082	0
7L_a9-3	88013	33,32	7L_b9-3	88095	32,99	7L_c9-3	88082	35,22	7L_d9-3	88082	0
7L_a9-4	88013	11,61	7L_b9-4	88095	26,13	7L_c9-4	88082	28,86	7L_d9-4	88082	0
7L_a9-5	88013	39,3	7L_b9-5	88095	40,44	7L_c9-5	88082	36,02	7L_d9-5	88082	0
7L_a10-1	88013	57,81	7L_b10-1	88095	0,41	7L_c10-1	88082	0	7L_d10-1	88082	0
7L_a10-2	88095	38,55	7L_b10-2	88095	0	7L_c10-2	88082	1,24	7L_d10-2	88082	0
7L_a10-3	88095	30,03	7L_b10-3	88095	0,47	7L_c10-3	88082	0	7L_d10-3	88082	0
7L_a10-4	88095	19,9	7L_b10-4	88095	0	7L_c10-4	88082	0	7L_d10-4	88082	0
7L_a10-5	88095	46,66	7L_b10-5	88095	0	7L_c10-5	88082	0,26	7L_d10-5	88082	0

Tab. C3: Pilzbefall von *N. nucifera* im Frühsommer 2004

Entnahme am 27.05.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
1L_a1-1	88007	0	1L_b1-1	88000	0	1L_c1-1	88000	0	1L_d1-1	88000	0
1L_a1-2	88000	0	1L_b1-2	88000	0	1L_c1-2	88000	0	1L_d1-2	88000	0
1L_a1-3	88000	0	1L_b1-3	88000	0	1L_c1-3	88000	0	1L_d1-3	88000	0
1L_a1-4	88000	0	1L_b1-4	88000	0	1L_c1-4	88000	0	1L_d1-4	88000	0
1L_a1-5	88000	0	1L_b1-5	88000	0	1L_c1-5	88000	0	1L_d1-5	88000	0
1L_a2-1	88000	0	1L_b2-1	88000	0	1L_c2-1	88000	0	1L_d2-1	88000	0
1L_a2-2	88000	0	1L_b2-2	88000	0	1L_c2-2	88000	0	1L_d2-2	88000	0
1L_a2-3	88000	0	1L_b2-3	88000	0	1L_c2-3	88000	0	1L_d2-3	88000	0
1L_a2-4	88000	0	1L_b2-4	88000	0	1L_c2-4	88000	0	1L_d2-4	88000	0
1L_a2-5	88000	0	1L_b2-5	88000	0	1L_c2-5	88000	0	1L_d2-5	88000	0
1L_a3-1	88000	0	1L_b3-1	88000	0	1L_c3-1	88000	0	1L_d3-1	88000	0
1L_a3-2	88000	0	1L_b3-2	88000	0	1L_c3-2	88000	0	1L_d3-2	88000	0
1L_a3-3	88000	0	1L_b3-3	88000	0	1L_c3-3	88000	0	1L_d3-3	88000	0
1L_a3-4	88000	0	1L_b3-4	88000	0	1L_c3-4	88000	0	1L_d3-4	88000	0
1L_a3-5	88000	0	1L_b3-5	88000	0	1L_c3-5	88000	0	1L_d3-5	88000	0
1L_a4-1	88000	0	1L_b4-1	88000	0	1L_c4-1	88000	0	1L_d4-1	88000	0
1L_a4-2	88000	0	1L_b4-2	88000	0	1L_c4-2	88000	0	1L_d4-2	88000	0
1L_a4-3	88000	0	1L_b4-3	88000	0	1L_c4-3	88000	0	1L_d4-3	88000	0
1L_a4-4	88000	0	1L_b4-4	88000	0	1L_c4-4	88000	0	1L_d4-4	88000	0
1L_a4-5	88000	0	1L_b4-5	88000	0	1L_c4-5	88000	0	1L_d4-5	88000	0
1L_a5-1	88000	0	1L_b5-1	88000	0	1L_c5-1	88000	0	1L_d5-1	88000	0
1L_a5-2	88000	0	1L_b5-2	88000	0	1L_c5-2	88000	0	1L_d5-2	88000	0
1L_a5-3	88000	0	1L_b5-3	88000	0	1L_c5-3	88000	0	1L_d5-3	88000	0
1L_a5-4	88000	0	1L_b5-4	88000	0	1L_c5-4	88000	0	1L_d5-4	88000	0
1L_a5-5	88000	0,23	1L_b5-5	88000	0	1L_c5-5	88000	0	1L_d5-5	88000	0
1L_a6-1	88000	0	1L_b6-1	88000	0	1L_c6-1	88000	0	1L_d6-1	88000	0
1L_a6-2	88000	0	1L_b6-2	88000	0	1L_c6-2	88000	0	1L_d6-2	88000	0
1L_a6-3	88000	0	1L_b6-3	88000	0	1L_c6-3	88000	0	1L_d6-3	88000	0
1L_a6-4	88000	0	1L_b6-4	88000	0	1L_c6-4	88000	0	1L_d6-4	88000	0
1L_a6-5	88000	0	1L_b6-5	88000	0	1L_c6-5	88000	0	1L_d6-5	88000	0
1L_a7-1	88000	0	1L_b7-1	88000	0	1L_c7-1	88000	0	1L_d7-1	88000	0
1L_a7-2	88000	0	1L_b7-2	88000	0	1L_c7-2	88000	0	1L_d7-2	88000	0
1L_a7-3	88000	0	1L_b7-3	88000	0	1L_c7-3	88000	0	1L_d7-3	88000	0
1L_a7-4	88000	0	1L_b7-4	88000	0	1L_c7-4	88000	0	1L_d7-4	88000	0
1L_a7-5	88000	0	1L_b7-5	88000	0	1L_c7-5	88000	0	1L_d7-5	88000	0

Fortsetzung Tab. C3:

Entnahme am 03.06.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
2L_a1-1	88000	0	2L_b1-1	88000	0	2L_c1-1	88000	0	2L_d1-1	88000	0
2L_a1-2	88000	0	2L_b1-2	88000	0	2L_c1-2	88000	0	2L_d1-2	88000	0
2L_a1-3	88000	0	2L_b1-3	88000	0	2L_c1-3	88000	0	2L_d1-3	88000	0
2L_a1-4	88000	0	2L_b1-4	88000	0	2L_c1-4	88000	0	2L_d1-4	88000	0
2L_a1-5	88000	0	2L_b1-5	88000	0	2L_c1-5	88000	0,49	2L_d1-5	88000	0
2L_a2-1	88000	0,24	2L_b2-1	88000	0	2L_c2-1	88000	0,25	2L_d2-1	88000	0
2L_a2-2	88000	0	2L_b2-2	88000	0	2L_c2-2	88000	0	2L_d2-2	88000	0
2L_a2-3	88000	0	2L_b2-3	88000	0	2L_c2-3	88000	0	2L_d2-3	88000	0
2L_a2-4	88000	0	2L_b2-4	88000	0	2L_c2-4	88000	0,2	2L_d2-4	88000	0
2L_a2-5	88000	0	2L_b2-5	88000	0	2L_c2-5	88000	0	2L_d2-5	88000	0
2L_a3-1	88000	0	2L_b3-1	88000	0	2L_c3-1	88000	0	2L_d3-1	88000	0

2L_a3-2	88000	0	2L_b3-2	88000	0	2L_c3-2	88000	0	2L_d3-2	88000	0
2L_a3-3	88000	0	2L_b3-3	88000	0	2L_c3-3	88000	0,35	2L_d3-3	88000	0
2L_a3-4	88000	0	2L_b3-4	88000	0	2L_c3-4	88000	0	2L_d3-4	88000	0
2L_a3-5	88000	0	2L_b3-5	88000	0	2L_c3-5	88000	0	2L_d3-5	88000	0
2L_a4-1	88000	0	2L_b4-1	88000	0	2L_c4-1	88000	0	2L_d4-1	88000	0
2L_a4-2	88000	0	2L_b4-2	88000	0	2L_c4-2	88000	0	2L_d4-2	88000	0
2L_a4-3	88000	0	2L_b4-3	88000	0	2L_c4-3	88000	0	2L_d4-3	88000	0
2L_a4-4	88000	0	2L_b4-4	88000	0	2L_c4-4	88000	0	2L_d4-4	88000	0
2L_a4-5	88000	0	2L_b4-5	88000	0	2L_c4-5	88000	0	2L_d4-5	88000	0
2L_a5-1	88000	0	2L_b5-1	88000	0	2L_c5-1	88000	0	2L_d5-1	88000	0
2L_a5-2	88000	0	2L_b5-2	88000	0	2L_c5-2	88000	0	2L_d5-2	88000	0
2L_a5-3	88000	0	2L_b5-3	88000	0	2L_c5-3	88000	0	2L_d5-3	88000	0
2L_a5-4	88000	0	2L_b5-4	88000	0	2L_c5-4	88000	0	2L_d5-4	88000	0
2L_a5-5	88000	0	2L_b5-5	88000	0	2L_c5-5	88000	0,27	2L_d5-5	88000	0
2L_a6-1	88000	0	2L_b6-1	88000	0	2L_c6-1	88000	0	2L_d6-1	88000	0
2L_a6-2	88000	0	2L_b6-2	88000	0	2L_c6-2	88000	0	2L_d6-2	88000	0
2L_a6-3	88000	0	2L_b6-3	88000	0	2L_c6-3	88000	0	2L_d6-3	88000	0
2L_a6-4	88000	0	2L_b6-4	88000	0	2L_c6-4	88000	0	2L_d6-4	88000	0
2L_a6-5	88000	0	2L_b6-5	88000	0	2L_c6-5	88000	0	2L_d6-5	88000	0
2L_a7-1	88000	0	2L_b7-1	88000	0	2L_c7-1	88000	0	2L_d7-1	88000	0
2L_a7-2	88000	0	2L_b7-2	88000	0	2L_c7-2	88000	0	2L_d7-2	88000	0
2L_a7-3	88000	0	2L_b7-3	88000	0	2L_c7-3	88000	0	2L_d7-3	88000	0
2L_a7-4	88000	0	2L_b7-4	88000	0	2L_c7-4	88000	0,34	2L_d7-4	88000	0
2L_a7-5	88000	0	2L_b7-5	88000	0	2L_c7-5	88000	0	2L_d7-5	88000	0

Fortsetzung Tab. C3:

Entnahme am 09.06.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
3L_a1-1	88000	0	3L_b1-1	88000	0	3L_c1-1	88000	0	3L_d1-1	88000	0
3L_a1-2	88000	0	3L_b1-2	88000	0	3L_c1-2	88000	0	3L_d1-2	88000	0
3L_a1-3	88000	0	3L_b1-3	88000	0	3L_c1-3	88000	0	3L_d1-3	88000	0
3L_a1-4	88000	0	3L_b1-4	88000	0	3L_c1-4	88000	0	3L_d1-4	88000	0
3L_a1-5	88000	0,34	3L_b1-5	88000	0	3L_c1-5	88000	0	3L_d1-5	88000	0
3L_a2-1	88000	1,16	3L_b2-1	88000	0	3L_c2-1	88000	0	3L_d2-1	88000	0
3L_a2-2	88000	0	3L_b2-2	88000	0	3L_c2-2	88000	0	3L_d2-2	88000	0
3L_a2-3	88000	0	3L_b2-3	88000	0	3L_c2-3	88000	0	3L_d2-3	88000	0
3L_a2-4	88000	0	3L_b2-4	88000	0	3L_c2-4	88000	0	3L_d2-4	88000	0
3L_a2-5	88000	0	3L_b2-5	88000	0	3L_c2-5	88000	0	3L_d2-5	88000	0
3L_a3-1	88000	0	3L_b3-1	88000	0	3L_c3-1	88000	0	3L_d3-1	88000	0
3L_a3-2	88000	0	3L_b3-2	88000	0	3L_c3-2	88000	7,05	3L_d3-2	88000	0
3L_a3-3	88000	0	3L_b3-3	88000	0	3L_c3-3	88000	0	3L_d3-3	88000	0
3L_a3-4	88000	0	3L_b3-4	88000	0	3L_c3-4	88000	0	3L_d3-4	88000	0
3L_a3-5	88000	0	3L_b3-5	88000	0	3L_c3-5	88000	0	3L_d3-5	88000	0
3L_a4-1	88000	0,24	3L_b4-1	88000	0	3L_c4-1	88000	0	3L_d4-1	88000	0
3L_a4-2	88000	0	3L_b4-2	88000	0	3L_c4-2	88000	0	3L_d4-2	88000	0
3L_a4-3	88000	0	3L_b4-3	88000	0	3L_c4-3	88000	0	3L_d4-3	88000	0
3L_a4-4	88000	0	3L_b4-4	88000	0	3L_c4-4	88000	0,6	3L_d4-4	88000	0
3L_a4-5	88000	0	3L_b4-5	88000	0	3L_c4-5	88000	0	3L_d4-5	88000	0
3L_a5-1	88000	0	3L_b5-1	88000	0	3L_c5-1	88000	0	3L_d5-1	88000	0
3L_a5-2	88000	0	3L_b5-2	88000	0	3L_c5-2	88000	0	3L_d5-2	88000	0
3L_a5-3	88000	0	3L_b5-3	88000	0	3L_c5-3	88000	1,57	3L_d5-3	88000	0
3L_a5-4	88000	0	3L_b5-4	88000	0	3L_c5-4	88000	0	3L_d5-4	88000	0
3L_a5-5	88000	0	3L_b5-5	88000	0	3L_c5-5	88000	0	3L_d5-5	88000	0
3L_a6-1	88000	0	3L_b6-1	88000	0	3L_c6-1	88000	0	3L_d6-1	88000	0
3L_a6-2	88000	0	3L_b6-2	88000	0	3L_c6-2	88000	0	3L_d6-2	88000	0
3L_a6-3	88000	0	3L_b6-3	88000	0	3L_c6-3	88000	0	3L_d6-3	88000	0

3L_a6-4	88000	0	3L_b6-4	88000	0	3L_c6-4	88000	3,2	3L_d6-4	88000	0
3L_a6-5	88000	0	3L_b6-5	88000	0	3L_c6-5	88000	0	3L_d6-5	88000	0
3L_a7-1	88000	0	3L_b7-1	88000	0	3L_c7-1	88000	4,93	3L_d7-1	88000	0
3L_a7-2	88000	0	3L_b7-2	88000	0	3L_c7-2	88000	0	3L_d7-2	88000	0
3L_a7-3	88000	0	3L_b7-3	88000	0	3L_c7-3	88000	0	3L_d7-3	88000	0
3L_a7-4	88000	0	3L_b7-4	88000	0	3L_c7-4	88000	0,33	3L_d7-4	88000	0,31
3L_a7-5	88000	0,22	3L_b7-5	88000	0	3L_c7-5	88000	0,91	3L_d7-5	88000	0

Fortsetzung Tab. C3:

Entnahme am 17.06.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
4L_a1-1	88000	0	4L_b1-1	88000	0	4L_c1-1	88000	0	4L_d1-1	88000	0
4L_a1-2	88000	0	4L_b1-2	88000	0	4L_c1-2	88000	0	4L_d1-2	88000	0
4L_a1-3	88000	0	4L_b1-3	88000	0	4L_c1-3	88000	0,86	4L_d1-3	88000	0
4L_a1-4	88000	0	4L_b1-4	88000	0,42	4L_c1-4	88000	0	4L_d1-4	88000	0
4L_a1-5	88000	0	4L_b1-5	88000	0	4L_c1-5	88000	0	4L_d1-5	88000	0
4L_a2-1	88000	0	4L_b2-1	88000	0	4L_c2-1	88000	0	4L_d2-1	88000	0
4L_a2-2	88000	0	4L_b2-2	88000	0	4L_c2-2	88000	0,97	4L_d2-2	88000	0
4L_a2-3	88000	0	4L_b2-3	88000	0	4L_c2-3	88000	0	4L_d2-3	88000	0
4L_a2-4	88000	0	4L_b2-4	88000	0	4L_c2-4	88000	0	4L_d2-4	88000	0
4L_a2-5	88000	0	4L_b2-5	88000	0	4L_c2-5	88000	0	4L_d2-5	88000	0
4L_a3-1	88000	0	4L_b3-1		-	4L_c3-1	88000	0	4L_d3-1	88000	0
4L_a3-2	88000	0	4L_b3-2		-	4L_c3-2	88000	0	4L_d3-2	88000	0
4L_a3-3	88000	0	4L_b3-3		-	4L_c3-3	88000	0	4L_d3-3	88000	0
4L_a3-4	88000	0	4L_b3-4		-	4L_c3-4	88000	0	4L_d3-4	88000	0
4L_a3-5	88000	0	4L_b3-5		-	4L_c3-5	88000	0	4L_d3-5	88000	0
4L_a4-1	88000	0	4L_b4-1	88000	0	4L_c4-1	88000	11,54	4L_d4-1	88000	0
4L_a4-2	88000	0	4L_b4-2	88000	0	4L_c4-2	88000	0	4L_d4-2	88000	0
4L_a4-3	88000	0	4L_b4-3	88000	0	4L_c4-3	88000	0,41	4L_d4-3	88000	0
4L_a4-4	88000	0	4L_b4-4	88000	0	4L_c4-4	88000	0	4L_d4-4	88000	0
4L_a4-5	88000	0	4L_b4-5	88000	0	4L_c4-5	88000	0,28	4L_d4-5	88000	0
4L_a5-1	88000	0	4L_b5-1	88000	0	4L_c5-1	88000	0	4L_d5-1	88000	0
4L_a5-2	88000	0	4L_b5-2	88000	0	4L_c5-2	88000	0	4L_d5-2	88000	0
4L_a5-3	88000	0	4L_b5-3	88000	0	4L_c5-3	88000	0,29	4L_d5-3	88000	0
4L_a5-4	88000	0	4L_b5-4	88000	0	4L_c5-4	88000	0	4L_d5-4	88000	0
4L_a5-5	88000	0	4L_b5-5	88000	0	4L_c5-5	88000	0	4L_d5-5	88000	0
4L_a6-1	88000	0	4L_b6-1	88000	0	4L_c6-1	88000	0,56	4L_d6-1	88000	0
4L_a6-2	88000	0	4L_b6-2	88000	0	4L_c6-2	88000	0	4L_d6-2	88000	0
4L_a6-3	88000	0	4L_b6-3	88000	0	4L_c6-3	88000	0	4L_d6-3	88000	0
4L_a6-4	88000	0	4L_b6-4	88000	0	4L_c6-4	88000	0,23	4L_d6-4	88000	0
4L_a6-5	88000	0	4L_b6-5	88000	0	4L_c6-5	88000	0	4L_d6-5	88000	0
4L_a7-1	88000	0	4L_b7-1	88000	0	4L_c7-1	88000	0	4L_d7-1	88000	0
4L_a7-2	88000	0	4L_b7-2	88000	0	4L_c7-2	88000	7,47	4L_d7-2	88000	0
4L_a7-3	88000	0	4L_b7-3	88000	0	4L_c7-3	88000	4,52	4L_d7-3	88000	0
4L_a7-4	88000	0	4L_b7-4	88000	0	4L_c7-4	88000	0	4L_d7-4	88000	0
4L_a7-5	88000	0	4L_b7-5	88000	0	4L_c7-5	88000	0	4L_d7-5	88000	0

Fortsetzung Tab. C3:

Entnahme am 24.06.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
5L_a1-1	88000	0	5L_b1-1	88000	0	5L_c1-1	88000	0	5L_d1-1	88000	0
5L_a1-2	88000	0	5L_b1-2	88000	0	5L_c1-2	88000	0	5L_d1-2	88000	0

5L_a1-3	88000	0	5L_b1-3	88000	0	5L_c1-3	88000	0	5L_d1-3	88000	0
5L_a1-4	88000	0	5L_b1-4	88000	0	5L_c1-4	88000	4	5L_d1-4	88000	0
5L_a1-5	88000	0	5L_b1-5	88000	0	5L_c1-5	88000	0	5L_d1-5	88000	0
5L_a2-1	88000	0,94	5L_b2-1	88000	0	5L_c2-1	88000	0	5L_d2-1	88000	0
5L_a2-2	88000	0	5L_b2-2	88000	0	5L_c2-2	88000	0	5L_d2-2	88000	0
5L_a2-3	88000	0	5L_b2-3	88000	0	5L_c2-3	88000	0	5L_d2-3	88000	0
5L_a2-4	88000	0	5L_b2-4	88000	0	5L_c2-4	88000	0	5L_d2-4	88000	0
5L_a2-5	88000	0,11	5L_b2-5	88000	0	5L_c2-5	88000	2,3	5L_d2-5	88000	0
5L_a3-1	88000	0	5L_b3-1	88000	0	5L_c3-1	88000	0	5L_d3-1	88000	0
5L_a3-2	88000	0	5L_b3-2	88000	0	5L_c3-2	88000	0	5L_d3-2	88000	0
5L_a3-3	88000	0,23	5L_b3-3	88000	0	5L_c3-3	88000	22,86	5L_d3-3	88000	0
5L_a3-4	88000	0	5L_b3-4	88000	0	5L_c3-4	88000	0	5L_d3-4	88000	0
5L_a3-5	88000	0	5L_b3-5	88000	0	5L_c3-5	88000	0	5L_d3-5	88000	0
5L_a4-1	88000	0	5L_b4-1	88000	0	5L_c4-1	88000	0	5L_d4-1	88000	0
5L_a4-2	88000	0	5L_b4-2	88000	0	5L_c4-2	88000	0	5L_d4-2	88000	0
5L_a4-3	88000	0	5L_b4-3	88000	0	5L_c4-3	88000	0	5L_d4-3	88000	0
5L_a4-4	88000	0	5L_b4-4	88000	0	5L_c4-4	88000	0	5L_d4-4	88000	0
5L_a4-5	88000	0	5L_b4-5	88000	0	5L_c4-5	88000	0,26	5L_d4-5	88000	0
5L_a5-1	88000	0	5L_b5-1	88000	0	5L_c5-1	88000	0	5L_d5-1	88000	0
5L_a5-2	88000	0	5L_b5-2	88000	0	5L_c5-2	88000	0,64	5L_d5-2	88000	0
5L_a5-3	88000	0	5L_b5-3	88000	0	5L_c5-3	88000	0	5L_d5-3	88000	0
5L_a5-4	88000	0	5L_b5-4	88000	0	5L_c5-4	88000	0	5L_d5-4	88000	0
5L_a5-5	88000	0	5L_b5-5	88000	0	5L_c5-5	88000	0	5L_d5-5	88000	0
5L_a6-1	88000	0	5L_b6-1	88000	0	5L_c6-1	88000	0,37	5L_d6-1	88000	0
5L_a6-2	88000	0,18	5L_b6-2	88000	0	5L_c6-2	88000	0	5L_d6-2	88000	0
5L_a6-3	88000	0	5L_b6-3	88000	0	5L_c6-3	88000	0	5L_d6-3	88000	0
5L_a6-4	88000	0	5L_b6-4	88000	0	5L_c6-4	88000	0	5L_d6-4	88000	0
5L_a6-5	88000	0	5L_b6-5	88000	0	5L_c6-5	88000	0	5L_d6-5	88000	0
5L_a7-1	88000	0,29	5L_b7-1	88000	0	5L_c7-1	88000	0	5L_d7-1	88000	0
5L_a7-2	88000	0	5L_b7-2	88000	0	5L_c7-2	88000	0	5L_d7-2	88000	0
5L_a7-3	88000	0	5L_b7-3	88000	0	5L_c7-3	88000	0	5L_d7-3	88000	0
5L_a7-4	88000	0	5L_b7-4	88000	0	5L_c7-4	88000	0	5L_d7-4	88000	0,25
5L_a7-5	88000	0	5L_b7-5	88000	0	5L_c7-5	88000	0,22	5L_d7-5	88000	0

Fortsetzung Tab. C3:

Entnahme am 01.07.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
6L_a1-1	88000	0	6L_b1-1		-	6L_c1-1	88000	9,86	6L_d1-1	88000	0
6L_a1-2	88000	0	6L_b1-2		-	6L_c1-2	88000	4,01	6L_d1-2	88000	0
6L_a1-3	88000	0	6L_b1-3		-	6L_c1-3	88000	3,43	6L_d1-3	88000	0
6L_a1-4	88000	0	6L_b1-4		-	6L_c1-4	88000	0,26	6L_d1-4	88000	0
6L_a1-5	88000	0	6L_b1-5		-	6L_c1-5	88000	0,52	6L_d1-5	88000	0
6L_a2-1	88000	0	6L_b2-1		-	6L_c2-1	88000	0,48	6L_d2-1	88000	0
6L_a2-2	88000	0	6L_b2-2		-	6L_c2-2	88000	0,87	6L_d2-2	88000	0
6L_a2-3	88000	0	6L_b2-3		-	6L_c2-3	88000	3,66	6L_d2-3	88000	0
6L_a2-4	88000	0	6L_b2-4		-	6L_c2-4	88000	2,53	6L_d2-4	88000	0
6L_a2-5	88000	0	6L_b2-5		-	6L_c2-5	88000	0	6L_d2-5	88000	0
6L_a3-1	88000	0	6L_b3-1	88000	0	6L_c3-1	88000	22,66	6L_d3-1	88000	0
6L_a3-2	88000	0	6L_b3-2	88000	0	6L_c3-2	88000	9,12	6L_d3-2	88000	0
6L_a3-3	88000	0	6L_b3-3	88000	0	6L_c3-3	88000	12,06	6L_d3-3	88000	0
6L_a3-4	88000	0	6L_b3-4	88000	0	6L_c3-4	88000	11,51	6L_d3-4	88000	0
6L_a3-5	88000	0	6L_b3-5	88000	0	6L_c3-5	88000	27,41	6L_d3-5	88000	0
6L_a4-1	88000	0	6L_b4-1	88000	0	6L_c4-1	88000	32,03	6L_d4-1	88000	0
6L_a4-2	88000	0	6L_b4-2	88000	0	6L_c4-2	88000	28,82	6L_d4-2	88000	0
6L_a4-3	88000	0	6L_b4-3	88000	0	6L_c4-3	88000	8,84	6L_d4-3	88000	0
6L_a4-4	88000	0	6L_b4-4	88000	0	6L_c4-4	88000	21,05	6L_d4-4	88000	0

6L_a4-5	88000	0	6L_b4-5	88000	0	6L_c4-5	88000	14,82	6L_d4-5	88000	0
6L_a5-1	88000	0	6L_b5-1	88000	0	6L_c5-1	88000	0	6L_d5-1	88000	0
6L_a5-2	88000	0	6L_b5-2	88000	0	6L_c5-2	88000	0	6L_d5-2	88000	0
6L_a5-3	88000	0	6L_b5-3	88000	0	6L_c5-3	88000	0	6L_d5-3	88000	0
6L_a5-4	88000	0	6L_b5-4	88000	0	6L_c5-4	88000	0	6L_d5-4	88000	0
6L_a5-5	88000	0	6L_b5-5	88000	0	6L_c5-5	88000	0	6L_d5-5	88000	0
6L_a6-1	88000	0	6L_b6-1	88000	0	6L_c6-1	88000	28,88	6L_d6-1	88000	0
6L_a6-2	88000	0	6L_b6-2	88000	0	6L_c6-2	88000	16,25	6L_d6-2	88000	0
6L_a6-3	88000	0	6L_b6-3	88000	0	6L_c6-3	88000	28,1	6L_d6-3	88000	0
6L_a6-4	88000	0	6L_b6-4	88000	0	6L_c6-4	88000	1,32	6L_d6-4	88000	0
6L_a6-5	88000	0	6L_b6-5	88000	0	6L_c6-5	88000	13,91	6L_d6-5	88000	0
6L_a7-1	88000	0	6L_b7-1	88000	0	6L_c7-1	88000	3,47	6L_d7-1	88000	0
6L_a7-2	88000	0	6L_b7-2	88000	0	6L_c7-2	88000	11,27	6L_d7-2	88000	0
6L_a7-3	88000	0	6L_b7-3	88000	0	6L_c7-3	88000	38,17	6L_d7-3	88000	0
6L_a7-4	88000	0	6L_b7-4	88000	0	6L_c7-4	88000	13,78	6L_d7-4	88000	0
6L_a7-5	88000	0	6L_b7-5	88000	0	6L_c7-5	88000	16,92	6L_d7-5	88000	0

Fortsetzung Tab. C3:

Entnahme am 08.07.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)	Probe	Größe (µm²)	Belegung (%)
7L_a1-1	88000	0	7L_b1-1	88000	0	7L_c1-1	88000	12,12	7L_d1-1	88000	0
7L_a1-2	88000	0	7L_b1-2	88000	0	7L_c1-2	88000	20,25	7L_d1-2	88000	0
7L_a1-3	88000	0	7L_b1-3	88000	0	7L_c1-3	88000	13,07	7L_d1-3	88000	0
7L_a1-4	88000	0	7L_b1-4	88000	0	7L_c1-4	88000	26,81	7L_d1-4	88000	0
7L_a1-5	88000	0	7L_b1-5	88000	0	7L_c1-5	88000	12,77	7L_d1-5	88000	0
7L_a2-1	88000	0	7L_b2-1	88000	0	7L_c2-1	88000	31,54	7L_d2-1	88000	0
7L_a2-2	88000	0	7L_b2-2	88000	0	7L_c2-2	88000	35,93	7L_d2-2	88000	0
7L_a2-3	88000	0	7L_b2-3	88000	0	7L_c2-3	88000	33,24	7L_d2-3	88000	0
7L_a2-4	88000	0	7L_b2-4	88000	0	7L_c2-4	88000	30,25	7L_d2-4	88000	0
7L_a2-5	88000	0	7L_b2-5	88000	0	7L_c2-5	88000	28,13	7L_d2-5	88000	0
7L_a3-1	88000	2,04	7L_b3-1	88000	0	7L_c3-1	88000	27,47	7L_d3-1	88000	0
7L_a3-2	88000	0	7L_b3-2	88000	0	7L_c3-2	88000	24,8	7L_d3-2	88000	0,21
7L_a3-3	88000	0	7L_b3-3	88000	0	7L_c3-3	88000	6,87	7L_d3-3	88000	0
7L_a3-4	88000	0	7L_b3-4	88000	0	7L_c3-4	88000	18,49	7L_d3-4	88000	0
7L_a3-5	88000	0	7L_b3-5	88000	0	7L_c3-5	88000	6	7L_d3-5	88000	0
7L_a4-1	88000	0	7L_b4-1	88000	0	7L_c4-1	88000	29,6	7L_d4-1	88000	0
7L_a4-2	88000	0	7L_b4-2	88000	0	7L_c4-2	88000	29,67	7L_d4-2	88000	0
7L_a4-3	88000	0	7L_b4-3	88000	0	7L_c4-3	88000	41,37	7L_d4-3	88000	0
7L_a4-4	88000	0	7L_b4-4	88000	0	7L_c4-4	88000	34,13	7L_d4-4	88000	0
7L_a4-5	88000	1,26	7L_b4-5	88000	0	7L_c4-5	88000	35,69	7L_d4-5	88000	0
7L_a5-1	88000	0	7L_b5-1	88000	0	7L_c5-1	88000	0	7L_d5-1	88000	0
7L_a5-2	88000	0	7L_b5-2	88000	0	7L_c5-2	88000	1,59	7L_d5-2	88000	0
7L_a5-3	88000	0	7L_b5-3	88000	0	7L_c5-3	88000	9,38	7L_d5-3	88000	0
7L_a5-4	88000	0	7L_b5-4	88000	0	7L_c5-4	88000	2,3	7L_d5-4	88000	0
7L_a5-5	88000	0	7L_b5-5	88000	0	7L_c5-5	88000	1,53	7L_d5-5	88000	0
7L_a6-1	88000	0	7L_b6-1	88000	0	7L_c6-1	88000	25,87	7L_d6-1	88000	0
7L_a6-2	88000	0,23	7L_b6-2	88000	0	7L_c6-2	88000	35,37	7L_d6-2	88000	0
7L_a6-3	88000	0	7L_b6-3	88000	0	7L_c6-3	88000	9,18	7L_d6-3	88000	0
7L_a6-4	88000	0	7L_b6-4	88000	0	7L_c6-4	88000	28,79	7L_d6-4	88000	0
7L_a6-5	88000	0	7L_b6-5	88000	0	7L_c6-5	88000	33,72	7L_d6-5	88000	0
7L_a7-1	88000	0	7L_b7-1	88000	0	7L_c7-1	88000	23,43	7L_d7-1	88000	0
7L_a7-2	88000	0	7L_b7-2	88000	0	7L_c7-2	88000	30,95	7L_d7-2	88000	0
7L_a7-3	88000	0	7L_b7-3	88000	0	7L_c7-3	88000	36,07	7L_d7-3	88000	0
7L_a7-4	88000	0	7L_b7-4	88000	0	7L_c7-4	88000	36,86	7L_d7-4	88000	0
7L_a7-5	88000	0	7L_b7-5	88000	0	7L_c7-5	88000	34,32	7L_d7-5	88000	0

Tab. C4: Pilzbefall von *N. nucifera* im Spätsommer 2004

Entnahme am 19.08.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse
OL_a1-1	88000	1	OL_b1-1	88000	1	OL_c1-1	88000	1	OL_d1-1	88000	1
OL_a1-2	88000	1	OL_b1-2	88000	1	OL_c1-2	88000	1	OL_d1-2	88000	1
OL_a1-3	88000	1	OL_b1-3	88000	1	OL_c1-3	88000	1	OL_d1-3	88000	1
OL_a1-4	88000	1	OL_b1-4	88000	1	OL_c1-4	88000	1	OL_d1-4	88000	1
OL_a1-5	88000	1	OL_b1-5	88000	1	OL_c1-5	88000	1	OL_d1-5	88000	1
OL_a2-1	88000	1	OL_b2-1	88000	1	OL_c2-1	88000	1	OL_d2-1	88000	1
OL_a2-2	88000	1	OL_b2-2	88000	1	OL_c2-2	88000	1	OL_d2-2	88000	1
OL_a2-3	88000	1	OL_b2-3	88000	1	OL_c2-3	88000	1	OL_d2-3	88000	1
OL_a2-4	88000	1	OL_b2-4	88000	1	OL_c2-4	88000	1	OL_d2-4	88000	1
OL_a2-5	88000	1	OL_b2-5	88000	1	OL_c2-5	88000	1	OL_d2-5	88000	1
OL_a3-1	88000	1	OL_b3-1	88000	1	OL_c3-1	88000	1	OL_d3-1	88000	1
OL_a3-2	88000	1	OL_b3-2	88000	1	OL_c3-2	88000	1	OL_d3-2	88000	1
OL_a3-3	88000	1	OL_b3-3	88000	1	OL_c3-3	88000	1	OL_d3-3	88000	1
OL_a3-4	88000	1	OL_b3-4	88000	1	OL_c3-4	88000	1	OL_d3-4	88000	1
OL_a3-5	88000	1	OL_b3-5	88000	1	OL_c3-5	88000	1	OL_d3-5	88000	1
OL_a4-1	88000	1	OL_b4-1	88000	1	OL_c4-1	88000	1	OL_d4-1	88000	1
OL_a4-2	88000	1	OL_b4-2	88000	1	OL_c4-2	88000	1	OL_d4-2	88000	1
OL_a4-3	88000	1	OL_b4-3	88000	1	OL_c4-3	88000	1	OL_d4-3	88000	1
OL_a4-4	88000	1	OL_b4-4	88000	1	OL_c4-4	88000	1	OL_d4-4	88000	1
OL_a4-5	88000	1	OL_b4-5	88000	1	OL_c4-5	88000	1	OL_d4-5	88000	1
OL_a5-1	88000	1	OL_b5-1	88000	1	OL_c5-1	88000	1	OL_d5-1	88000	1
OL_a5-2	88000	1	OL_b5-2	88000	1	OL_c5-2	88000	1	OL_d5-2	88000	1
OL_a5-3	88000	1	OL_b5-3	88000	1	OL_c5-3	88000	1	OL_d5-3	88000	1
OL_a5-4	88000	1	OL_b5-4	88000	1	OL_c5-4	88000	1	OL_d5-4	88000	1
OL_a5-5	88000	1	OL_b5-5	88000	1	OL_c5-5	88000	1	OL_d5-5	88000	1
OL_a6-1	88000	1	OL_b6-1	88000	1	OL_c6-1	88000	1	OL_d6-1	88000	1
OL_a6-2	88000	1	OL_b6-2	88000	1	OL_c6-2	88000	1	OL_d6-2	88000	1
OL_a6-3	88000	1	OL_b6-3	88000	1	OL_c6-3	88000	1	OL_d6-3	88000	1
OL_a6-4	88000	1	OL_b6-4	88000	1	OL_c6-4	88000	1	OL_d6-4	88000	1
OL_a6-5	88000	1	OL_b6-5	88000	1	OL_c6-5	88000	1	OL_d6-5	88000	1
OL_a7-1	88000	1	OL_b7-1	88000	1	OL_c7-1	88000	1	OL_d7-1	88000	1
OL_a7-2	88000	1	OL_b7-2	88000	1	OL_c7-2	88000	1	OL_d7-2	88000	1
OL_a7-3	88000	1	OL_b7-3	88000	1	OL_c7-3	88000	1	OL_d7-3	88000	1
OL_a7-4	88000	1	OL_b7-4	88000	1	OL_c7-4	88000	1	OL_d7-4	88000	1
OL_a7-5	88000	1	OL_b7-5	88000	1	OL_c7-5	88000	1	OL_d7-5	88000	1
OL_a8-1	88000	1	OL_b8-1	88000	1	OL_c8-1	88000	1	OL_d8-1	88000	1
OL_a8-2	88000	1	OL_b8-2	88000	1	OL_c8-2	88000	1	OL_d8-2	88000	1
OL_a8-3	88000	1	OL_b8-3	88000	1	OL_c8-3	88000	1	OL_d8-3	88000	1
OL_a8-4	88000	1	OL_b8-4	88000	1	OL_c8-4	88000	1	OL_d8-4	88000	1
OL_a8-5	88000	1	OL_b8-5	88000	1	OL_c8-5	88000	1	OL_d8-5	88000	1
OL_a9-1	88000	1	OL_b9-1	88000	1	OL_c9-1	88000	1	OL_d9-1	88000	1
OL_a9-2	88000	1	OL_b9-2	88000	1	OL_c9-2	88000	1	OL_d9-2	88000	1
OL_a9-3	88000	1	OL_b9-3	88000	1	OL_c9-3	88000	1	OL_d9-3	88000	1
OL_a9-4	88000	1	OL_b9-4	88000	1	OL_c9-4	88000	1	OL_d9-4	88000	1
OL_a9-5	88000	1	OL_b9-5	88000	1	OL_c9-5	88000	1	OL_d9-5	88000	1
OL_a10-1	88000	1	OL_b10-1	88000	1	OL_c10-1	88000	1	OL_d10-1	88000	1
OL_a10-2	88000	1	OL_b10-2	88000	1	OL_c10-2	88000	1	OL_d10-2	88000	1
OL_a10-3	88000	1	OL_b10-3	88000	1	OL_c10-3	88000	1	OL_d10-3	88000	1
OL_a10-4	88000	1	OL_b10-4	88000	1	OL_c10-4	88000	1	OL_d10-4	88000	1
OL_a10-5	88000	1	OL_b10-5	88000	1	OL_c10-5	88000	1	OL_d10-5	88000	1

Fortsetzung Tab. C4:

Entnahme am 26.08.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse
1L_a1-1	88000	1	1L_b1-1	88000	1	1L_c1-1	88000	1	1L_d1-1	88000	1
1L_a1-2	88000	1	1L_b1-2	88000	1	1L_c1-2	88000	1	1L_d1-2	88000	1
1L_a1-3	88000	1	1L_b1-3	88000	1	1L_c1-3	88000	1	1L_d1-3	88000	1
1L_a1-4	88000	1	1L_b1-4	88000	1	1L_c1-4	88000	1	1L_d1-4	88000	1
1L_a1-5	88000	1	1L_b1-5	88000	1	1L_c1-5	88000	1	1L_d1-5	88000	1
1L_a2-1	88000	1	1L_b2-1	88000	1	1L_c2-1	88000	1	1L_d2-1	88000	1
1L_a2-2	88000	1	1L_b2-2	88000	1	1L_c2-2	88000	1	1L_d2-2	88000	1
1L_a2-3	88000	1	1L_b2-3	88000	1	1L_c2-3	88000	1	1L_d2-3	88000	1
1L_a2-4	88000	1	1L_b2-4	88000	1	1L_c2-4	88000	1	1L_d2-4	88000	1
1L_a2-5	88000	1	1L_b2-5	88000	1	1L_c2-5	88000	1	1L_d2-5	88000	1
1L_a3-1	88000	1	1L_b3-1	88000	1	1L_c3-1	88000	1	1L_d3-1	88000	1
1L_a3-2	88000	1	1L_b3-2	88000	1	1L_c3-2	88000	1	1L_d3-2	88000	1
1L_a3-3	88000	1	1L_b3-3	88000	1	1L_c3-3	88000	1	1L_d3-3	88000	1
1L_a3-4	88000	1	1L_b3-4	88000	1	1L_c3-4	88000	1	1L_d3-4	88000	1
1L_a3-5	88000	1	1L_b3-5	88000	1	1L_c3-5	88000	1	1L_d3-5	88000	1
1L_a4-1	88000	1	1L_b4-1	88000	1	1L_c4-1	88000	1	1L_d4-1	88000	1
1L_a4-2	88000	1	1L_b4-2	88000	1	1L_c4-2	88000	1	1L_d4-2	88000	1
1L_a4-3	88000	1	1L_b4-3	88000	1	1L_c4-3	88000	1	1L_d4-3	88000	1
1L_a4-4	88000	1	1L_b4-4	88000	1	1L_c4-4	88000	1	1L_d4-4	88000	1
1L_a4-5	88000	1	1L_b4-5	88000	1	1L_c4-5	88000	1	1L_d4-5	88000	1
1L_a5-1	88000	1	1L_b5-1	88000	1	1L_c5-1	88000	1	1L_d5-1	88000	1
1L_a5-2	88000	1	1L_b5-2	88000	1	1L_c5-2	88000	1	1L_d5-2	88000	1
1L_a5-3	88000	1	1L_b5-3	88000	1	1L_c5-3	88000	1	1L_d5-3	88000	1
1L_a5-4	88000	1	1L_b5-4	88000	1	1L_c5-4	88000	1	1L_d5-4	88000	1
1L_a5-5	88000	1	1L_b5-5	88000	1	1L_c5-5	88000	1	1L_d5-5	88000	1
1L_a6-1	88000	1	1L_b6-1	88000	1	1L_c6-1	88000	1	1L_d6-1	88000	1
1L_a6-2	88000	1	1L_b6-2	88000	1	1L_c6-2	88000	1	1L_d6-2	88000	1
1L_a6-3	88000	1	1L_b6-3	88000	1	1L_c6-3	88000	1	1L_d6-3	88000	1
1L_a6-4	88000	1	1L_b6-4	88000	1	1L_c6-4	88000	1	1L_d6-4	88000	1
1L_a6-5	88000	1	1L_b6-5	88000	1	1L_c6-5	88000	1	1L_d6-5	88000	1
1L_a7-1	88000	1	1L_b7-1	88000	1	1L_c7-1	88000	1	1L_d7-1	88000	1
1L_a7-2	88000	1	1L_b7-2	88000	1	1L_c7-2	88000	1	1L_d7-2	88000	1
1L_a7-3	88000	1	1L_b7-3	88000	1	1L_c7-3	88000	1	1L_d7-3	88000	1
1L_a7-4	88000	1	1L_b7-4	88000	1	1L_c7-4	88000	1	1L_d7-4	88000	1
1L_a7-5	88000	1	1L_b7-5	88000	1	1L_c7-5	88000	1	1L_d7-5	88000	1
1L_a8-1	88000	1	1L_b8-1	88000	1	1L_c8-1	88000	1	1L_d8-1	88000	1
1L_a8-2	88000	1	1L_b8-2	88000	1	1L_c8-2	88000	1	1L_d8-2	88000	1
1L_a8-3	88000	1	1L_b8-3	88000	2	1L_c8-3	88000	1	1L_d8-3	88000	1
1L_a8-4	88000	1	1L_b8-4	88000	1	1L_c8-4	88000	1	1L_d8-4	88000	1
1L_a8-5	88000	1	1L_b8-5	88000	1	1L_c8-5	88000	1	1L_d8-5	88000	1
1L_a9-1	88000	1	1L_b9-1	88000	1	1L_c9-1	88000	1	1L_d9-1	88000	1
1L_a9-2	88000	1	1L_b9-2	88000	1	1L_c9-2	88000	1	1L_d9-2	88000	1
1L_a9-3	88000	1	1L_b9-3	88000	1	1L_c9-3	88000	1	1L_d9-3	88000	1
1L_a9-4	88000	1	1L_b9-4	88000	1	1L_c9-4	88000	1	1L_d9-4	88000	1
1L_a9-5	88000	1	1L_b9-5	88000	1	1L_c9-5	88000	1	1L_d9-5	88000	1
1L_a10-1	88000	1	1L_b10-1	88000	1	1L_c10-1	88000	1	1L_d10-1	88000	1
1L_a10-2	88000	1	1L_b10-2	88000	1	1L_c10-2	88000	1	1L_d10-2	88000	1
1L_a10-3	88000	1	1L_b10-3	88000	1	1L_c10-3	88000	1	1L_d10-3	88000	1
1L_a10-4	88000	1	1L_b10-4	88000	1	1L_c10-4	88000	1	1L_d10-4	88000	1
1L_a10-5	88000	1	1L_b10-5	88000	1	1L_c10-5	88000	1	1L_d10-5	88000	1

Fortsetzung Tab. C4:

Entnahme am 02.09.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse
2L_a1-1	88000	1	2L_b1-1	88000	1	2L_c1-1	88000	1	2L_d1-1	88000	1
2L_a1-2	88000	1	2L_b1-2	88000	1	2L_c1-2	88000	1	2L_d1-2	88000	1
2L_a1-3	88000	1	2L_b1-3	88000	1	2L_c1-3	88000	1	2L_d1-3	88000	1
2L_a1-4	88000	1	2L_b1-4	88000	1	2L_c1-4	88000	1	2L_d1-4	88000	1
2L_a1-5	88000	1	2L_b1-5	88000	1	2L_c1-5	88000	1	2L_d1-5	88000	1
2L_a2-1	88000	1	2L_b2-1	88000	1	2L_c2-1	88000	1	2L_d2-1	88000	2
2L_a2-2	88000	1	2L_b2-2	88000	1	2L_c2-2	88000	1	2L_d2-2	88000	1
2L_a2-3	88000	1	2L_b2-3	88000	1	2L_c2-3	88000	1	2L_d2-3	88000	1
2L_a2-4	88000	1	2L_b2-4	88000	1	2L_c2-4	88000	1	2L_d2-4	88000	1
2L_a2-5	88000	1	2L_b2-5	88000	1	2L_c2-5	88000	1	2L_d2-5	88000	1
2L_a3-1	88000	1	2L_b3-1	88000	1	2L_c3-1	88000	1	2L_d3-1	88000	1
2L_a3-2	88000	1	2L_b3-2	88000	1	2L_c3-2	88000	1	2L_d3-2	88000	1
2L_a3-3	88000	1	2L_b3-3	88000	1	2L_c3-3	88000	1	2L_d3-3	88000	1
2L_a3-4	88000	1	2L_b3-4	88000	1	2L_c3-4	88000	1	2L_d3-4	88000	1
2L_a3-5	88000	1	2L_b3-5	88000	1	2L_c3-5	88000	1	2L_d3-5	88000	1
2L_a4-1	88000	3	2L_b4-1	88000	1	2L_c4-1	88000	1	2L_d4-1	88000	1
2L_a4-2	88000	2	2L_b4-2	88000	1	2L_c4-2	88000	1	2L_d4-2	88000	1
2L_a4-3	88000	2	2L_b4-3	88000	1	2L_c4-3	88000	2	2L_d4-3	88000	1
2L_a4-4	88000	2	2L_b4-4	88000	1	2L_c4-4	88000	1	2L_d4-4	88000	1
2L_a4-5	88000	2	2L_b4-5	88000	1	2L_c4-5	88000	1	2L_d4-5	88000	1
2L_a5-1	88000	1	2L_b5-1	88000	1	2L_c5-1	88000	1	2L_d5-1	88000	1
2L_a5-2	88000	2	2L_b5-2	88000	1	2L_c5-2	88000	3	2L_d5-2	88000	1
2L_a5-3	88000	1	2L_b5-3	88000	1	2L_c5-3	88000	1	2L_d5-3	88000	1
2L_a5-4	88000	1	2L_b5-4	88000	1	2L_c5-4	88000	2	2L_d5-4	88000	1
2L_a5-5	88000	1	2L_b5-5	88000	1	2L_c5-5	88000	1	2L_d5-5	88000	1
2L_a6-1	88000	2	2L_b6-1	88000	1	2L_c6-1	88000	1	2L_d6-1	88000	1
2L_a6-2	88000	1	2L_b6-2	88000	1	2L_c6-2	88000	1	2L_d6-2	88000	1
2L_a6-3	88000	1	2L_b6-3	88000	1	2L_c6-3	88000	3	2L_d6-3	88000	1
2L_a6-4	88000	1	2L_b6-4	88000	1	2L_c6-4	88000	1	2L_d6-4	88000	1
2L_a6-5	88000	2	2L_b6-5	88000	1	2L_c6-5	88000	1	2L_d6-5	88000	1
2L_a7-1	88000	1	2L_b7-1	88000	1	2L_c7-1	88000	1	2L_d7-1	88000	1
2L_a7-2	88000	1	2L_b7-2	88000	1	2L_c7-2	88000	1	2L_d7-2	88000	1
2L_a7-3	88000	1	2L_b7-3	88000	1	2L_c7-3	88000	1	2L_d7-3	88000	1
2L_a7-4	88000	1	2L_b7-4	88000	1	2L_c7-4	88000	1	2L_d7-4	88000	1
2L_a7-5	88000	1	2L_b7-5	88000	1	2L_c7-5	88000	1	2L_d7-5	88000	1
2L_a8-1	88000	1	2L_b8-1	88000	1	2L_c8-1	88000	1	2L_d8-1	88000	1
2L_a8-2	88000	1	2L_b8-2	88000	1	2L_c8-2	88000	1	2L_d8-2	88000	1
2L_a8-3	88000	1	2L_b8-3	88000	1	2L_c8-3	88000	2	2L_d8-3	88000	1
2L_a8-4	88000	1	2L_b8-4	88000	1	2L_c8-4	88000	1	2L_d8-4	88000	1
2L_a8-5	88000	1	2L_b8-5	88000	1	2L_c8-5	88000	1	2L_d8-5	88000	1
2L_a9-1	88000	1	2L_b9-1	88000	1	2L_c9-1	88000	2	2L_d9-1	88000	1
2L_a9-2	88000	2	2L_b9-2	88000	1	2L_c9-2	88000	1	2L_d9-2	88000	1
2L_a9-3	88000	2	2L_b9-3	88000	1	2L_c9-3	88000	1	2L_d9-3	88000	2
2L_a9-4	88000	2	2L_b9-4	88000	1	2L_c9-4	88000	1	2L_d9-4	88000	3
2L_a9-5	88000	1	2L_b9-5	88000	1	2L_c9-5	88000	2	2L_d9-5	88000	1
2L_a10-1	88000	1	2L_b10-1	88000	1	2L_c10-1	88000	1	2L_d10-1	88000	1
2L_a10-2	88000	1	2L_b10-2	88000	1	2L_c10-2	88000	1	2L_d10-2	88000	1
2L_a10-3	88000	1	2L_b10-3	88000	1	2L_c10-3	88000	1	2L_d10-3	88000	1
2L_a10-4	88000	1	2L_b10-4	88000	1	2L_c10-4	88000	2	2L_d10-4	88000	1
2L_a10-5	88000	1	2L_b10-5	88000	1	2L_c10-5	88000	1	2L_d10-5	88000	1

Fortsetzung Tab. C4:

Entnahme am 09.09.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse
3L_a1-1	88000	3	3L_b1-1	88000	1	3L_c1-1	88000	5	3L_d1-1	88000	1
3L_a1-2	88000	3	3L_b1-2	88000	1	3L_c1-2	88000	3	3L_d1-2	88000	1
3L_a1-3	88000	2	3L_b1-3	88000	1	3L_c1-3	88000	4	3L_d1-3	88000	1
3L_a1-4	88000	4	3L_b1-4	88000	1	3L_c1-4	88000	4	3L_d1-4	88000	1
3L_a1-5	88000	3	3L_b1-5	88000	1	3L_c1-5	88000	5	3L_d1-5	88000	2
3L_a2-1	88000	2	3L_b2-1	88000	1	3L_c2-1	88000	3	3L_d2-1	88000	1
3L_a2-2	88000	4	3L_b2-2	88000	1	3L_c2-2	88000	3	3L_d2-2	88000	1
3L_a2-3	88000	1	3L_b2-3	88000	1	3L_c2-3	88000	1	3L_d2-3	88000	1
3L_a2-4	88000	3	3L_b2-4	88000	1	3L_c2-4	88000	2	3L_d2-4	88000	1
3L_a2-5	88000	2	3L_b2-5	88000	1	3L_c2-5	88000	3	3L_d2-5	88000	1
3L_a3-1	88000	1	3L_b3-1	88000	1	3L_c3-1	88000	3	3L_d3-1	88000	2
3L_a3-2	88000	2	3L_b3-2	88000	1	3L_c3-2	88000	3	3L_d3-2	88000	4
3L_a3-3	88000	1	3L_b3-3	88000	1	3L_c3-3	88000	4	3L_d3-3	88000	2
3L_a3-4	88000	1	3L_b3-4	88000	1	3L_c3-4	88000	3	3L_d3-4	88000	3
3L_a3-5	88000	1	3L_b3-5	88000	1	3L_c3-5	88000	3	3L_d3-5	88000	3
3L_a4-1	88000	2	3L_b4-1	88000	1	3L_c4-1	88000	3	3L_d4-1	88000	1
3L_a4-2	88000	3	3L_b4-2	88000	1	3L_c4-2	88000	3	3L_d4-2	88000	1
3L_a4-3	88000	3	3L_b4-3	88000	1	3L_c4-3	88000	3	3L_d4-3	88000	1
3L_a4-4	88000	3	3L_b4-4	88000	1	3L_c4-4	88000	4	3L_d4-4	88000	1
3L_a4-5	88000	2	3L_b4-5	88000	1	3L_c4-5	88000	3	3L_d4-5	88000	1
3L_a5-1	88000	1	3L_b5-1	88000	1	3L_c5-1	88000	4	3L_d5-1	88000	1
3L_a5-2	88000	1	3L_b5-2	88000	1	3L_c5-2	88000	2	3L_d5-2	88000	1
3L_a5-3	88000	1	3L_b5-3	88000	1	3L_c5-3	88000	3	3L_d5-3	88000	1
3L_a5-4	88000	1	3L_b5-4	88000	1	3L_c5-4	88000	4	3L_d5-4	88000	1
3L_a5-5	88000	1	3L_b5-5	88000	1	3L_c5-5	88000	3	3L_d5-5	88000	1
3L_a6-1	88000	3	3L_b6-1	88000	1	3L_c6-1	88000	2	3L_d6-1	88000	1
3L_a6-2	88000	3	3L_b6-2	88000	1	3L_c6-2	88000	3	3L_d6-2	88000	1
3L_a6-3	88000	4	3L_b6-3	88000	1	3L_c6-3	88000	3	3L_d6-3	88000	1
3L_a6-4	88000	1	3L_b6-4	88000	1	3L_c6-4	88000	3	3L_d6-4	88000	1
3L_a6-5	88000	1	3L_b6-5	88000	1	3L_c6-5	88000	3	3L_d6-5	88000	1
3L_a7-1	88000	3	3L_b7-1	88000	1	3L_c7-1	88000	1	3L_d7-1	88000	1
3L_a7-2	88000	2	3L_b7-2	88000	1	3L_c7-2	88000	3	3L_d7-2	88000	1
3L_a7-3	88000	1	3L_b7-3	88000	1	3L_c7-3	88000	4	3L_d7-3	88000	1
3L_a7-4	88000	1	3L_b7-4	88000	1	3L_c7-4	88000	2	3L_d7-4	88000	1
3L_a7-5	88000	2	3L_b7-5	88000	1	3L_c7-5	88000	1	3L_d7-5	88000	1
3L_a8-1	88000	4	3L_b8-1	88000	1	3L_c8-1	88000	3	3L_d8-1	88000	1
3L_a8-2	88000	6	3L_b8-2	88000	1	3L_c8-2	88000	4	3L_d8-2	88000	1
3L_a8-3	88000	2	3L_b8-3	88000	1	3L_c8-3	88000	1	3L_d8-3	88000	1
3L_a8-4	88000	4	3L_b8-4	88000	1	3L_c8-4	88000	4	3L_d8-4	88000	1
3L_a8-5	88000	4	3L_b8-5	88000	1	3L_c8-5	88000	3	3L_d8-5	88000	1
3L_a9-1	88000	1	3L_b9-1	88000	1	3L_c9-1	88000	2	3L_d9-1	88000	1
3L_a9-2	88000	2	3L_b9-2	88000	1	3L_c9-2	88000	2	3L_d9-2	88000	1
3L_a9-3	88000	1	3L_b9-3	88000	1	3L_c9-3	88000	2	3L_d9-3	88000	1
3L_a9-4	88000	1	3L_b9-4	88000	1	3L_c9-4	88000	2	3L_d9-4	88000	1
3L_a9-5	88000	1	3L_b9-5	88000	1	3L_c9-5	88000	1	3L_d9-5	88000	1
3L_a10-1	88000	1	3L_b10-1	88000	2	3L_c10-1	88000	3	3L_d10-1	88000	1
3L_a10-2	88000	1	3L_b10-2	88000	1	3L_c10-2	88000	1	3L_d10-2	88000	1
3L_a10-3	88000	1	3L_b10-3	88000	1	3L_c10-3	88000	2	3L_d10-3	88000	2
3L_a10-4	88000	1	3L_b10-4	88000	1	3L_c10-4	88000	2	3L_d10-4	88000	1
3L_a10-5	88000	1	3L_b10-5	88000	4	3L_c10-5	88000	2	3L_d10-5	88000	1

Fortsetzung Tab. C4:

Entnahme am 16.09.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse
4L_a1-1	88000	3	4L_b1-1	88000	1	4L_c1-1	88000	4	4L_d1-1	88000	1
4L_a1-2	88000	4	4L_b1-2	88000	1	4L_c1-2	88000	3	4L_d1-2	88000	1
4L_a1-3	88000	5	4L_b1-3	88000	1	4L_c1-3	88000	4	4L_d1-3	88000	1
4L_a1-4	88000	3	4L_b1-4	88000	1	4L_c1-4	88000	4	4L_d1-4	88000	1
4L_a1-5	88000	4	4L_b1-5	88000	1	4L_c1-5	88000	5	4L_d1-5	88000	1
4L_a2-1	88000	2	4L_b2-1	88000	1	4L_c2-1	88000	3	4L_d2-1	88000	1
4L_a2-2	88000	2	4L_b2-2	88000	1	4L_c2-2	88000	3	4L_d2-2	88000	1
4L_a2-3	88000	2	4L_b2-3	88000	1	4L_c2-3	88000	4	4L_d2-3	88000	1
4L_a2-4	88000	1	4L_b2-4	88000	1	4L_c2-4	88000	3	4L_d2-4	88000	1
4L_a2-5	88000	3	4L_b2-5	88000	1	4L_c2-5	88000	3	4L_d2-5	88000	1
4L_a3-1	88000	4	4L_b3-1	88000	1	4L_c3-1	88000	3	4L_d3-1	88000	1
4L_a3-2	88000	6	4L_b3-2	88000	1	4L_c3-2	88000	4	4L_d3-2	88000	1
4L_a3-3	88000	6	4L_b3-3	88000	1	4L_c3-3	88000	4	4L_d3-3	88000	1
4L_a3-4	88000	4	4L_b3-4	88000	1	4L_c3-4	88000	3	4L_d3-4	88000	1
4L_a3-5	88000	5	4L_b3-5	88000	1	4L_c3-5	88000	4	4L_d3-5	88000	1
4L_a4-1	88000	1	4L_b4-1	88000	1	4L_c4-1	88000	3	4L_d4-1	88000	1
4L_a4-2	88000	3	4L_b4-2	88000	1	4L_c4-2	88000	3	4L_d4-2	88000	2
4L_a4-3	88000	1	4L_b4-3	88000	1	4L_c4-3	88000	4	4L_d4-3	88000	1
4L_a4-4	88000	2	4L_b4-4	88000	1	4L_c4-4	88000	3	4L_d4-4	88000	1
4L_a4-5	88000	4	4L_b4-5	88000	1	4L_c4-5	88000	2	4L_d4-5	88000	1
4L_a5-1	88000	4	4L_b5-1	88000	2	4L_c5-1	88000	4	4L_d5-1	88000	1
4L_a5-2	88000	5	4L_b5-2	88000	1	4L_c5-2	88000	4	4L_d5-2	88000	1
4L_a5-3	88000	4	4L_b5-3	88000	1	4L_c5-3	88000	3	4L_d5-3	88000	3
4L_a5-4	88000	5	4L_b5-4	88000	1	4L_c5-4	88000	3	4L_d5-4	88000	1
4L_a5-5	88000	3	4L_b5-5	88000	1	4L_c5-5	88000	4	4L_d5-5	88000	1
4L_a6-1	88000	3	4L_b6-1	88000	1	4L_c6-1	88000	3	4L_d6-1	88000	1
4L_a6-2	88000	4	4L_b6-2	88000	1	4L_c6-2	88000	3	4L_d6-2	88000	1
4L_a6-3	88000	3	4L_b6-3	88000	1	4L_c6-3	88000	3	4L_d6-3	88000	1
4L_a6-4	88000	4	4L_b6-4	88000	1	4L_c6-4	88000	3	4L_d6-4	88000	1
4L_a6-5	88000	4	4L_b6-5	88000	1	4L_c6-5	88000	3	4L_d6-5	88000	1
4L_a7-1	88000	2	4L_b7-1	88000	1	4L_c7-1	88000	3	4L_d7-1	88000	1
4L_a7-2	88000	2	4L_b7-2	88000	1	4L_c7-2	88000	2	4L_d7-2	88000	1
4L_a7-3	88000	1	4L_b7-3	88000	1	4L_c7-3	88000	3	4L_d7-3	88000	1
4L_a7-4	88000	2	4L_b7-4	88000	1	4L_c7-4	88000	3	4L_d7-4	88000	1
4L_a7-5	88000	2	4L_b7-5	88000	1	4L_c7-5	88000	3	4L_d7-5	88000	1
4L_a8-1	88000	4	4L_b8-1	88000	1	4L_c8-1	88000	3	4L_d8-1	88000	1
4L_a8-2	88000	3	4L_b8-2	88000	1	4L_c8-2	88000	4	4L_d8-2	88000	1
4L_a8-3	88000	4	4L_b8-3	88000	1	4L_c8-3	88000	4	4L_d8-3	88000	1
4L_a8-4	88000	3	4L_b8-4	88000	1	4L_c8-4	88000	3	4L_d8-4	88000	1
4L_a8-5	88000	3	4L_b8-5	88000	1	4L_c8-5	88000	4	4L_d8-5	88000	1
4L_a9-1	88000	5	4L_b9-1	88000	1	4L_c9-1	88000	4	4L_d9-1	88000	1
4L_a9-2	88000	4	4L_b9-2	88000	1	4L_c9-2	88000	4	4L_d9-2	88000	1
4L_a9-3	88000	4	4L_b9-3	88000	1	4L_c9-3	88000	4	4L_d9-3	88000	1
4L_a9-4	88000	3	4L_b9-4	88000	1	4L_c9-4	88000	3	4L_d9-4	88000	1
4L_a9-5	88000	3	4L_b9-5	88000	1	4L_c9-5	88000	3	4L_d9-5	88000	1
4L_a10-1	88000	4	4L_b10-1	88000	1	4L_c10-1	88000	3	4L_d10-1	88000	3
4L_a10-2	88000	3	4L_b10-2	88000	1	4L_c10-2	88000	3	4L_d10-2	88000	3
4L_a10-3	88000	4	4L_b10-3	88000	1	4L_c10-3	88000	4	4L_d10-3	88000	2
4L_a10-4	88000	4	4L_b10-4	88000	1	4L_c10-4	88000	4	4L_d10-4	88000	2
4L_a10-5	88000	3	4L_b10-5	88000	1	4L_c10-5	88000	4	4L_d10-5	88000	2

Fortsetzung Tab. C4:

Entnahme am 23.09.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse
5L_a1-1	88000	4	5L_b1-1	88000	3	5L_c1-1	88000	3	5L_d1-1	88000	1
5L_a1-2	88000	4	5L_b1-2	88000	4	5L_c1-2	88000	4	5L_d1-2	88000	1
5L_a1-3	88000	4	5L_b1-3	88000	2	5L_c1-3	88000	3	5L_d1-3	88000	1
5L_a1-4	88000	3	5L_b1-4	88000	3	5L_c1-4	88000	4	5L_d1-4	88000	1
5L_a1-5	88000	3	5L_b1-5	88000	3	5L_c1-5	88000	3	5L_d1-5	88000	1
5L_a2-1	88000	3	5L_b2-1	88000	1	5L_c2-1	88000	3	5L_d2-1	88000	1
5L_a2-2	88000	3	5L_b2-2	88000	1	5L_c2-2	88000	3	5L_d2-2	88000	1
5L_a2-3	88000	3	5L_b2-3	88000	1	5L_c2-3	88000	3	5L_d2-3	88000	1
5L_a2-4	88000	3	5L_b2-4	88000	1	5L_c2-4	88000	3	5L_d2-4	88000	1
5L_a2-5	88000	3	5L_b2-5	88000	1	5L_c2-5	88000	5	5L_d2-5	88000	1
5L_a3-1	88000	3	5L_b3-1	88000	1	5L_c3-1	88000	3	5L_d3-1	88000	1
5L_a3-2	88000	4	5L_b3-2	88000	1	5L_c3-2	88000	3	5L_d3-2	88000	1
5L_a3-3	88000	3	5L_b3-3	88000	1	5L_c3-3	88000	4	5L_d3-3	88000	1
5L_a3-4	88000	3	5L_b3-4	88000	1	5L_c3-4	88000	3	5L_d3-4	88000	1
5L_a3-5	88000	3	5L_b3-5	88000	1	5L_c3-5	88000	3	5L_d3-5	88000	1
5L_a4-1	88000	3	5L_b4-1	88000	1	5L_c4-1	88000	3	5L_d4-1	88000	1
5L_a4-2	88000	2	5L_b4-2	88000	1	5L_c4-2	88000	4	5L_d4-2	88000	1
5L_a4-3	88000	1	5L_b4-3	88000	1	5L_c4-3	88000	3	5L_d4-3	88000	1
5L_a4-4	88000	2	5L_b4-4	88000	1	5L_c4-4	88000	4	5L_d4-4	88000	1
5L_a4-5	88000	3	5L_b4-5	88000	1	5L_c4-5	88000	3	5L_d4-5	88000	1
5L_a5-1	88000	3	5L_b5-1	88000	5	5L_c5-1	88000	3	5L_d5-1	88000	1
5L_a5-2	88000	3	5L_b5-2	88000	5	5L_c5-2	88000	3	5L_d5-2	88000	1
5L_a5-3	88000	6	5L_b5-3	88000	4	5L_c5-3	88000	3	5L_d5-3	88000	1
5L_a5-4	88000	5	5L_b5-4	88000	4	5L_c5-4	88000	3	5L_d5-4	88000	1
5L_a5-5	88000	3	5L_b5-5	88000	3	5L_c5-5	88000	4	5L_d5-5	88000	1
5L_a6-1	88000	4	5L_b6-1	88000	1	5L_c6-1	88000	3	5L_d6-1	88000	2
5L_a6-2	88000	3	5L_b6-2	88000	1	5L_c6-2	88000	3	5L_d6-2	88000	1
5L_a6-3	88000	4	5L_b6-3	88000	1	5L_c6-3	88000	4	5L_d6-3	88000	2
5L_a6-4	88000	4	5L_b6-4	88000	1	5L_c6-4	88000	3	5L_d6-4	88000	1
5L_a6-5	88000	3	5L_b6-5	88000	1	5L_c6-5	88000	3	5L_d6-5	88000	1
5L_a7-1	88000	6	5L_b7-1	88000	1	5L_c7-1	88000	4	5L_d7-1	88000	5
5L_a7-2	88000	4	5L_b7-2	88000	1	5L_c7-2	88000	3	5L_d7-2	88000	2
5L_a7-3	88000	3	5L_b7-3	88000	2	5L_c7-3	88000	3	5L_d7-3	88000	3
5L_a7-4	88000	3	5L_b7-4	88000	1	5L_c7-4	88000	4	5L_d7-4	88000	3
5L_a7-5	88000	5	5L_b7-5	88000	1	5L_c7-5	88000	3	5L_d7-5	88000	5
5L_a8-1	88000	3	5L_b8-1	88000	1	5L_c8-1	88000	7	5L_d8-1	88000	4
5L_a8-2	88000	3	5L_b8-2	88000	1	5L_c8-2	88000	4	5L_d8-2	88000	4
5L_a8-3	88000	4	5L_b8-3	88000	1	5L_c8-3	88000	4	5L_d8-3	88000	4
5L_a8-4	88000	3	5L_b8-4	88000	1	5L_c8-4	88000	4	5L_d8-4	88000	4
5L_a8-5	88000	4	5L_b8-5	88000	1	5L_c8-5	88000	4	5L_d8-5	88000	5
5L_a9-1	88000	3	5L_b9-1	88000	1	5L_c9-1	88000	3	5L_d9-1	88000	3
5L_a9-2	88000	4	5L_b9-2	88000	1	5L_c9-2	88000	4	5L_d9-2	88000	4
5L_a9-3	88000	3	5L_b9-3	88000	1	5L_c9-3	88000	3	5L_d9-3	88000	3
5L_a9-4	88000	4	5L_b9-4	88000	1	5L_c9-4	88000	3	5L_d9-4	88000	3
5L_a9-5	88000	3	5L_b9-5	88000	1	5L_c9-5	88000	4	5L_d9-5	88000	2
5L_a10-1	88000	4	5L_b10-1	88000	1	5L_c10-1	88000	3	5L_d10-1	88000	1
5L_a10-2	88000	4	5L_b10-2	88000	1	5L_c10-2	88000	4	5L_d10-2	88000	1
5L_a10-3	88000	4	5L_b10-3	88000	1	5L_c10-3	88000	5	5L_d10-3	88000	2
5L_a10-4	88000	3	5L_b10-4	88000	1	5L_c10-4	88000	5	5L_d10-4	88000	2
5L_a10-5	88000	3	5L_b10-5	88000	1	5L_c10-5	88000	3	5L_d10-5	88000	2

Fortsetzung Tab. C4:

Entnahme am 30.09.2004

Variante oD			Variante oDb			Variante D			Variante Db		
Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse	Probe	Größe (µm²)	Klasse
6L_a1-1	88000	4	6L_b1-1	88000	3	6L_c1-1	88000	3	6L_d1-1	88000	1
6L_a1-2	88000	3	6L_b1-2	88000	3	6L_c1-2	88000	4	6L_d1-2	88000	1
6L_a1-3	88000	5	6L_b1-3	88000	4	6L_c1-3	88000	3	6L_d1-3	88000	1
6L_a1-4	88000	4	6L_b1-4	88000	4	6L_c1-4	88000	3	6L_d1-4	88000	1
6L_a1-5	88000	4	6L_b1-5	88000	3	6L_c1-5	88000	3	6L_d1-5	88000	1
6L_a2-1	88000	4	6L_b2-1	88000	1	6L_c2-1	88000	4	6L_d2-1	88000	1
6L_a2-2	88000	3	6L_b2-2	88000	1	6L_c2-2	88000	5	6L_d2-2	88000	1
6L_a2-3	88000	3	6L_b2-3	88000	1	6L_c2-3	88000	4	6L_d2-3	88000	1
6L_a2-4	88000	3	6L_b2-4	88000	1	6L_c2-4	88000	4	6L_d2-4	88000	1
6L_a2-5	88000	3	6L_b2-5	88000	1	6L_c2-5	88000	4	6L_d2-5	88000	1
6L_a3-1	88000	5	6L_b3-1	88000	1	6L_c3-1	88000	3	6L_d3-1	88000	5
6L_a3-2	88000	4	6L_b3-2	88000	1	6L_c3-2	88000	5	6L_d3-2	88000	5
6L_a3-3	88000	3	6L_b3-3	88000	1	6L_c3-3	88000	5	6L_d3-3	88000	6
6L_a3-4	88000	5	6L_b3-4	88000	1	6L_c3-4	88000	4	6L_d3-4	88000	6
6L_a3-5	88000	4	6L_b3-5	88000	1	6L_c3-5	88000	6	6L_d3-5	88000	6
6L_a4-1	88000	3	6L_b4-1	88000	3	6L_c4-1	88000	4	6L_d4-1	88000	1
6L_a4-2	88000	5	6L_b4-2	88000	5	6L_c4-2	88000	4	6L_d4-2	88000	1
6L_a4-3	88000	5	6L_b4-3	88000	3	6L_c4-3	88000	4	6L_d4-3	88000	1
6L_a4-4	88000	4	6L_b4-4	88000	5	6L_c4-4	88000	3	6L_d4-4	88000	1
6L_a4-5	88000	5	6L_b4-5	88000	4	6L_c4-5	88000	4	6L_d4-5	88000	1
6L_a5-1	88000	3	6L_b5-1	88000	1	6L_c5-1	88000	3	6L_d5-1	88000	4
6L_a5-2	88000	3	6L_b5-2	88000	1	6L_c5-2	88000	6	6L_d5-2	88000	3
6L_a5-3	88000	3	6L_b5-3	88000	1	6L_c5-3	88000	3	6L_d5-3	88000	2
6L_a5-4	88000	4	6L_b5-4	88000	1	6L_c5-4	88000	4	6L_d5-4	88000	4
6L_a5-5	88000	3	6L_b5-5	88000	1	6L_c5-5	88000	4	6L_d5-5	88000	3
6L_a6-1	88000	4	6L_b6-1	88000	2	6L_c6-1	88000	5	6L_d6-1	88000	1
6L_a6-2	88000	3	6L_b6-2	88000	1	6L_c6-2	88000	3	6L_d6-2	88000	1
6L_a6-3	88000	4	6L_b6-3	88000	2	6L_c6-3	88000	5	6L_d6-3	88000	1
6L_a6-4	88000	4	6L_b6-4	88000	2	6L_c6-4	88000	3	6L_d6-4	88000	1
6L_a6-5	88000	4	6L_b6-5	88000	3	6L_c6-5	88000	4	6L_d6-5	88000	1
6L_a7-1	88000	4	6L_b7-1	88000	1	6L_c7-1	88000	3	6L_d7-1	88000	3
6L_a7-2	88000	3	6L_b7-2	88000	1	6L_c7-2	88000	4	6L_d7-2	88000	2
6L_a7-3	88000	3	6L_b7-3	88000	1	6L_c7-3	88000	3	6L_d7-3	88000	1
6L_a7-4	88000	4	6L_b7-4	88000	1	6L_c7-4	88000	4	6L_d7-4	88000	2
6L_a7-5	88000	3	6L_b7-5	88000	1	6L_c7-5	88000	5	6L_d7-5	88000	4
6L_a8-1	88000	3	6L_b8-1	88000	5	6L_c8-1	88000	4	6L_d8-1	88000	3
6L_a8-2	88000	3	6L_b8-2	88000	4	6L_c8-2	88000	4	6L_d8-2	88000	4
6L_a8-3	88000	3	6L_b8-3	88000	5	6L_c8-3	88000	2	6L_d8-3	88000	4
6L_a8-4	88000	3	6L_b8-4	88000	6	6L_c8-4	88000	4	6L_d8-4	88000	4
6L_a8-5	88000	3	6L_b8-5	88000	6	6L_c8-5	88000	3	6L_d8-5	88000	4
6L_a9-1	88000	6	6L_b9-1	88000	1	6L_c9-1	88000	4	6L_d9-1	88000	1
6L_a9-2	88000	5	6L_b9-2	88000	1	6L_c9-2	88000	4	6L_d9-2	88000	1
6L_a9-3	88000	5	6L_b9-3	88000	1	6L_c9-3	88000	4	6L_d9-3	88000	1
6L_a9-4	88000	5	6L_b9-4	88000	1	6L_c9-4	88000	5	6L_d9-4	88000	1
6L_a9-5	88000	6	6L_b9-5	88000	1	6L_c9-5	88000	2	6L_d9-5	88000	1
6L_a10-1	88000	3	6L_b10-1	88000	1	6L_c10-1	88000	4	6L_d10-1	88000	2
6L_a10-2	88000	4	6L_b10-2	88000	1	6L_c10-2	88000	3	6L_d10-2	88000	1
6L_a10-3	88000	3	6L_b10-3	88000	1	6L_c10-3	88000	4	6L_d10-3	88000	1
6L_a10-4	88000	3	6L_b10-4	88000	1	6L_c10-4	88000	3	6L_d10-4	88000	1
6L_a10-5	88000	3	6L_b10-5	88000	1	6L_c10-5	88000	3	6L_d10-5	88000	2

Anhang D:

Modellsystem Algen und Baustoffe: Wachstum in Abhängigkeit der Benetzbarkeit

Tab. D1: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung bei Fassaden

Kontaktwinkel [°]												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
FU	135,05	136,3	134,9	135,15	134,55	134,1	134,4	131,35	133,15	134,45	134,3	-
FW	99,9	124,0	116,4	118,2	119,5	104,3	113,4	109,4	118,0	127,4	126,3	103,2
FV	132,55	137,1	126,7	134,7	123,5	135,8	132,6	137,85	138,1	131,75	133,1	-
FT	141,1	141,65	138,65	139,2	139,95	143,95	134,9	140,15	138,15	140,75	139,8	-

Tab. D2: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung bei Dachziegeln

Kontaktwinkel [°]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DA	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
DE	48,7	45,55	47,05	50,2	47,05	40,9	40,15	45,25	40,1	38,05
DL	143,7	143,75	144,3	144,45	143,9	143,85	144,4	144,95	144,25	144,1

* Tropfen gespreitet

Tab. D3: Ergebnis der Kontaktwinkelmessung bei Filterpapier (*Wachstumskontrolle*)

Kontaktwinkel [°]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Filterpapier	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

* Tropfen gespreitet

Tab. D4: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Filterpapier

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation I (NA I)

Filterpapier (Wachstumskontrolle)				
	Fluoreszenzintensität [V]			
	Kontrolle		Inokuliert	
	Woche 0	Woche 10	Woche 0	Woche 10
1	0,41	0,17	0,40	3,29
2	0,40	*	0,40	3,08
3	0,43	*	0,42	3,28
4	-	-	0,39	3,07
5	-	-	0,37	3,25

* Daten beim Transfer verloren gegangen

Tab. D5: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Fassadenfarbe FU

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation I (NA I)

Fassadenfarbe FU				
	Fluoreszenzintensität [V]			
	Kontrolle		Inokuliert	
	Woche 0	Woche 10	Woche 0	Woche 10
1	0,37	0,15	0,34	0,31

2	0,38	0,14	0,36	0,24
3	0,37	0,12	0,37	0,27
4	-	-	0,43	0,25
5	-	-	0,31	0,23

Tab. D6: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Fassadenfarbe FW

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation I (NA I)

Fassadenfarbe FW				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle		Inokuliert		
Woche 0	Woche 10	Woche 0	Woche 10	
1	0,27	0,09	0,24	0,30
2	0,25	0,08	0,26	0,30
3	0,27	0,09	0,21	0,24
4	-	-	0,24	0,29
5	-	-	0,24	0,24

Tab. D7: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Fassadenfarbe FV

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation I (NA I)

Fassadenfarbe FV				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle		Inokuliert		
Woche 0	Woche 10	Woche 0	Woche 10	
1	0,26	0,08	0,25	0,19
2	0,28	0,10	0,23	0,17
3	0,29	*	0,28	0,17
4	-	-	0,23	0,15
5	-	-	0,27	0,22

* Daten beim Transfer verloren gegangen

Tab. D8: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Fassadenfarbe FT

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation I (NA I)

Fassadenfarbe FT				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle		Inokuliert		
Woche 0	Woche 10	Woche 0	Woche 10	
1	0,27	0,11	0,27	0,19
2	0,30	*	0,29	0,17
3	0,29	0,14	0,28	0,17
4	-	-	0,29	0,19
5	-	-	0,27	0,17

* Daten beim Transfer verloren gegangen

Tab. D9: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Dachziegel DA

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation I (NA I)

Dachziegel DA				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle		Inokuliert		
Woche 0	Woche 10	Woche 0	Woche 10	
1	0,07	0,04	0,07	0,04
2	0,07	0,03	0,04	0,06
3	0,06	0,03	0,04	0,04
4	-	-	0,06	0,05
5	-	-	0,07	0,06

Tab. D10: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Dachziegel DE

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation I (NA I)

Dachziegel DE				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle		Inokuliert		
Woche 0	Woche 10	Woche 0	Woche 10	
1	0,07	0,01	0,05	0,03
2	0,04	0,01	0,05	0,04
3	0,03	0,01	0,05	0,05
4	-	-	0,05	0,04
5	-	-	0,06	0,04

Tab. D11: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Dachziegel DL

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation I (NA I)

Dachziegel DL				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle		Inokuliert		
Woche 0	Woche 10	Woche 0	Woche 10	
1	0,06	0,02	0,07	0,03
2	0,06	0,02	0,09	0,04
3	0,05	0,02	0,07	0,03
4	-	-	0,08	0,04
5	-	-	0,07	0,07

Tab. D12: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Filterpapier

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation II (NA II)

Filterpapier (Wachstumskontrolle)				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle		Inokuliert		
Woche 0	Woche 12	Woche 0	Woche 12	
1	0,31	0,10	0,34	1,59
2	0,32	0,08	0,33	1,05
3	0,32	0,08	0,32	1,61
4	-	-	0,32	1,23
5	-	-	0,30	1,35

Tab. D13: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Fassadenfarbe FU

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation II (NA II)

Fassadenfarbe FU			
Fluoreszenzintensität [V]			
Kontrolle		Inokuliert	
Woche 0	Woche 12	Woche 0	Woche 12
1	0,20	0,16	0,17
2	0,18	0,13	0,24
3	0,17	0,16	0,16
4	-	-	0,17
5	-	-	0,18

Tab. D14: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Fassadenfarbe FW

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation II (NA II)

Fassadenfarbe FW			
Fluoreszenzintensität [V]			
Kontrolle		Inokuliert	
Woche 0	Woche 12	Woche 0	Woche 12
1	0,11	0,09	0,15
2	0,17	0,10	0,11
3	0,11	0,09	0,11
4	-	-	0,12
5	-	-	0,17

Tab. D15: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Fassadenfarbe FV

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation II (NA II)

Fassadenfarbe FV			
Fluoreszenzintensität [V]			
Kontrolle		Inokuliert	
Woche 0	Woche 12	Woche 0	Woche 12
1	0,14	0,10	0,22
2	0,16	0,11	0,22
3	0,17	0,13	0,21
4	-	-	0,21
5	-	-	0,18

Tab. D16: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Fassadenfarbe FT*

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation II (NA II)

Fassadenfarbe FZ			
Fluoreszenzintensität [V]			
Kontrolle		Kontrolle	
Woche 0	Woche 12		Woche 0
1	0,16	0,09	1
2	0,18	0,10	2
3	0,16	0,10	3
4	-	-	4
5	-	-	0,17

Tab. D17: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Dachziegel DA

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation II (NA II)

Dachziegel DA				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle			Inokuliert	
	Woche 0	Woche 12	Woche 0	Woche 12
1	0,02	0,01	0,02	0,02
2	0,02	0,02	0,02	0,02
3	0,02	0,01	0,02	0,02
4	-	-	0,02	0,01
5	-	-	0,02	0,02

Tab. D18: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Dachziegel DE

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation II (NA II)

Dachziegel DE				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle			Inokuliert	
	Woche 0	Woche 12	Woche 0	Woche 12
1	0,01	0,01	0,02	0,02
2	0,02	0,01	0,01	0,01
3	0,01	0,01	0,01	0,01
4	-	-	0,02	0,01
5	-	-	0,01	0,01

Tab. D19: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bei Dachziegel DL

Versuchsdurchlauf: Nassinokulation II (NA II)

Dachziegel DL				
Fluoreszenzintensität [V]				
Kontrolle			Inokuliert	
	Woche 0	Woche 12	Woche 0	Woche 12
1	0,02	0,02	0,02	0,02
2	0,02	0,02	0,02	0,02
3	0,02	0,02	0,02	0,02
4	-	-	0,02	0,02
5	-	-	0,02	0,02

Anhang E:

Einfluss der Kondensation auf die Superhydrophobie

Tab. E1: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung mit Wasser bei pflanzlichen Oberflächen unter isothermen Bedingungen

Pflanze	Kontaktwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	157,5	158,5	155,5	155,5	159,0	156,5	156,5	160,5	153,5	155,5
<i>Alstroemeria aurantiaca</i>	164,3	168,4	165,5	166,3	166,3	160,3	159,9	164,3	164,4	161
<i>Apocynum cannabinum</i>	162,3	158,7	163,2	164,8	165,8	160,3	154	161,9	160,5	170,3
<i>Argemone mexicana</i>	165,2	162,6	158	161,2	161,4	161,1	170,3	167,2	164,7	169,9
<i>Brassica oleracea</i>	161,0	162,5	162,5	159,5	161,0	159,0	162,0	163,0	159,0	164,5
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	160,2	162,8	162,8	161,6	165,2	170	172,8	165,1	164,5	165,3
<i>Colocasia esculenta</i>	166,5	162	166	165	166,5	165,5	165,5	164,5	165	167
<i>Halimodendron halodendron</i>	151,7	167,9	159,6	164,3	160,3	157,3	165,1	161,7	164,9	160,3
<i>Nelumbo nucifera</i>	159,6	160,4	163,3	161,7	169	166	160,1	164,7	163,9	166,6
	176,1	162,8	157,2	168,9	159,4	163,9	157,3	156,1		
<i>Silene vulgaris</i>	161,3	163,6	161,9	160,2	167,7	158,5	162,7	162,4	159,4	166,5
<i>Thalictrum flavum</i>	157,9	161,5	159,6	156,6	164,9	162,5	161,6	163,6	172,1	162,5
<i>Tropaeolum majus</i>	160,5	161	163	161,5	164	164,5	162	162	162,5	163
<i>Xanthosoma robustum</i>	162,5	163,5	162,5	159	162,5	161	161,5	160,5	161	164,5

Tab. E2: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung mit Wasser bei pflanzlichen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 5°C

Pflanze	Kontaktwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	144,0	145,0	149,0	144,0	148,0	143,0	144,0	138,0	143,0	144,0
<i>Alstroemeria aurantiaca</i>	149,3	147,7	144,6	154,2	155,4	149,6	151,9	149,7	152,5	151,9
<i>Apocynum cannabinum</i>	156,6	152,4	163,2	159,4	158,1	128,2	143,6	147,4	153,8	142,4
<i>Argemone mexicana</i>	152,7	150,3	179,8	154,0	150,2	161,2	148,3	159,9	155,9	166,1
<i>Brassica oleracea</i>	142,0	155,0	138,0	137,0	133,0	141,0	150,0	147,0	150,0	145,0
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	145,2	156,0	148,1	146,8	156,0	159,1	163,3	160,7	162,3	159,0
<i>Colocasia esculenta</i>	153,0	162,0	158,0	157,0	159,0	159,0	161,0	155,0	158,0	161,0
<i>Halimodendron halodendron</i>	154,0	162,6	157,5	159,4	164,7	155,5	157,1	158,4	158,2	165,4
<i>Nelumbo nucifera</i>	160,8	169,0	163,5	162,6	169,1	167,3	163,0	165,1	156,3	161,9
<i>Silene vulgaris</i>	149,0	162,9	153,4	155,3	146,5	144,2	140,0	155,9	155,6	159,1
<i>Thalictrum flavum</i>	163,2	155,1	153,9	158,6	151,3	159,7	150,5	160,5	164,5	159,5
<i>Tropaeolum majus</i>	165,0	160,0	160,0	160,0	164,0	162,0	162,0	165,0	166,0	161,0
<i>Xanthosoma robustum</i>	159,0	155,0	162,0	159,0	156,0	155,0	158,0	159,0	151,0	157,0

Tab. E3: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung mit Wasser bei pflanzlichen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 10°C

Pflanze	Kontaktwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	136,0	134,0	134,0	134,0	132,0	134,0	135,0	126,0	131,0	132,0
<i>Alstroemeria aurantiaca</i>	151,7	153,9	154,1	157,2	146,6	148,1	151,8	152,2	151,6	141,3
<i>Apocynum cannabinum</i>	149,1	148,0	135,0	136,2	162,5	158,6	156,2	152,2	145,7	129,8
<i>Argemone mexicana</i>	149,6	158,7	144,6	151,4	149,7	150,4	151,3	153,0	143,7	152,2
<i>Brassica oleracea</i>	137,0	143,0	137,0	142,0	142,0	144,0	144,0	144,0	140,0	145,0
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	147,9	157,8	158,7	151,8	157,2	155,8	170,3	174,8	154,2	151,5

<i>Colocasia esculenta</i>	154,0	154,0	156,0	150,0	155,0	153,0	153,0	155,0	154,0	153,0
<i>Halimodendron halodendron</i>	155,0	149,3	154,0	156,0	149,1	156,3	154,8	155,8	162,4	155,6
<i>Nelumbo nucifera</i>	164,7	161,9	163,0	171,0	164,8	159,2	162,9	164,5	167,0	165,7
<i>Silene vulgaris</i>	139,7	141,1	141,2	145,6	151,3	152,5	150,0	144,3	147,6	165,3
<i>Thalictrum flavum</i>	145,1	149,8	136,2	152,8	153,2	148,1	137,9	156,9	158,6	156,0
<i>Tropaeolum majus</i>	156,0	160,0	151,0	160,0	160,0	153,0	161,0	156,0	160,0	162,0
<i>Xanthosoma robustum</i>	155,0	154,0	152,0	154,0	155,0	161,0	158,0	150,0	154,0	158,0

Tab. E4: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung mit Wasser bei pflanzlichen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 15°C

Pflanze	Kontaktwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	128,0	125,0	131,0	124,0	132,0	137,0	129,0	127,0	131,0	128,0
<i>Alstroemeria aurantiaca</i>	146,8	140,4	154,6	150,3	153,3	145,3	146,4	146,4	143,0	147,3
<i>Apocynum cannabinum</i>	153,4	147,2	147,2	145,8	154,4	149,8	153,4	147,0	149,6	148,1
<i>Argemone mexicana</i>	149,8	151,2	166,7	145,6	146,9	143,4	148,2	137,9	141,0	142,4
<i>Brassica oleracea</i>	137,0	136,0	125,0	132,0	133,0	139,0	137,0	133,0	136,0	141,0
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	159,1	143,1	140,5	163,7	148,1	149,3	161,7	159,9	151,7	164,8
<i>Colocasia esculenta</i>	150,0	155,0	155,0	153,0	154,0	153,0	155,0	151,0	154,0	153,0
<i>Halimodendron halodendron</i>	149,3	148,1	149,8	149,3	150,5	146,7	152,7	152,6	145,9	144,9
<i>Nelumbo nucifera</i>	158,8	168,9	166,7	156,5	157,0	163,3	165,5	163,6	154,4	160,4
<i>Silene vulgaris</i>	150,8	152,9	145,1	143,5	141,0	130,5	152,7	148,3	149,7	141,3
<i>Thalictrum flavum</i>	161,7	154,7	145,7	162,3	159,3	154,1	143,7	162,9	146,8	154,8
<i>Tropaeolum majus</i>	148,0	143,0	145,0	145,0	149,0	145,0	154,0	148,0	148,0	154,0
<i>Xanthosoma robustum</i>	150,0	151,0	148,0	148,0	146,0	148,0	155,0	144,0	151,0	150,0

Tab. E5: Ergebnisse der Abrollwinkelmessung mit Wasser bei pflanzlichen Oberflächen unter isothermen Bedingungen

Pflanze	Abrollwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	7,6	7,0	7,7	7,2	7,0	6,8	10,7	8,9	6,9	8,3
<i>Alstroemeria aurantiaca</i>	11,9	5,7	15,4	14,8	1,0	1,0	7,8	2,4	1,0	1,0
<i>Apocynum cannabinum</i>	1,0	1,0	11,3	13,5	1,0	30,3	28,1	26,5	9,1	11,4
<i>Argemone mexicana</i>	1,0	1,0	1,0	1,0	7,4	1,0	1,0	1,0	5,9	1,0
<i>Brassica oleracea</i>	0,0	2,4	1,8	0,0	0,0	0,7	1,6	2,5	0,5	0,9
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	15,9	19,6	9,8	10,7	12,5	8,7	7,8	14,2	18,8	17,2
<i>Colocasia esculenta</i>	0,9	1,7	2,6	1,3	1,5	1,8	0,7	2,3	1,6	2,3
<i>Halimodendron halodendron</i>	10,9	1,0	1,0	6,4	2,8	4,9	1,0	1,0	18,4	17,4
<i>Nelumbo nucifera</i>	7,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	1	1	1	1	2,6	1	1	1	1	1
<i>Silene vulgaris</i>	7,7	9,8	9,7	15,3	11,6	7,8	21,9	19,9	4,3	10,1
<i>Thalictrum flavum</i>	8,4	10,5	13,2	0,0	0,0	8,2	10,2	0,0	0,0	0,0
<i>Tropaeolum majus</i>	0,0	3,8	1,4	2,2	1,0	2,7	3,3	0,0	0,0	1,8
<i>Xanthosoma robustum</i>	2,6	3,2	1,8	2,6	2,1	3,1	2,5	2,6	2,2	1,9

Tab. E6: Ergebnisse der Abrollwinkelmessung mit Wasser bei pflanzlichen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 5°C

Pflanze	Abrollwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
<i>Alstroemeria aurantiaca</i>	10,0	20,4	1,0	8,4	8,1	17,9	32,7	30,9	20,3	27,7

<i>Apocynum cannabinum</i>	29,4	30,0	44,1	90,0	41,6	53,6	90,0	70,9	90,0	90,0
<i>Argemone mexicana</i>	34,5	41,8	37,3	28,2	25,6	33,6	25,7	33,3	21,0	1,0
<i>Brassica oleracea</i>	25,1	29,3	20,7	20,4	25,1	21,8	28,5	22,6	21,3	19,8
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	24,5	19,5	29,6	10,4	14,3	15,8	19,0	12,7	17,2	11,8
<i>Colocasia esculenta</i>	3,5	3,8	2,9	5,1	2,2	2,9	2,4	3,5	4,8	2,9
<i>Halimodendron halodendron</i>	10,8	11,2	13,5	8,9	20,3	25,5	20,3	14,0	24,9	18,3
<i>Nelumbo nucifera</i>	4,4	1,0	5,9	1,0	1,0	4,4	1,0	1,0	1,0	4,4
	1	1	4,3	3,6	1	1	6,6	1	1	4,4
<i>Silene vulgaris</i>	32,1	19,7	40,1	21,5	90,0	32,9	90,0	90,0	90,0	90,0
<i>Thalictrum flavum</i>	19,6	21,4	50,4	37,8	28,8	31,3	28,2	39,0	33,6	22,5
<i>Tropaeolum majus</i>	4,5	5,1	5,5	6,5	4,3	5,1	7,2	5,9	5,0	5,6
<i>Xanthosoma robustum</i>	6,2	4,6	6,2	7,3	3,9	6,5	4,6	5,8	4,8	4,3

Tab. E7: Ergebnisse der Abrollwinkelmessung mit Wasser bei pflanzlichen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 10°C

Pflanze	Abrollwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
<i>Alstroemeria aurantiaca</i>	37,7	28,1	31,2	34,8	45,1	49,1	25,7	39,2	37,2	25,6
<i>Apocynum cannabinum</i>	90,0	57,1	90,0	90,0	90,0	58,1	90,0	40,1	59,9	90,0
<i>Argemone mexicana</i>	18,6	17,3	53,5	24,6	17,4	27,4	28,3	24,5	18,4	26,7
<i>Brassica oleracea</i>	35,0	39,9	41,1	36,1	31,9	38,9	32,5	42,3	41,6	37,7
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	14,8	15,9	10,7	13,5	8,2	13,9	9,9	12,3	14,0	16,2
<i>Colocasia esculenta</i>	6,5	7,2	4,7	5,1	5,8	7,8	3,4	3,2	4,0	4,8
<i>Halimodendron halodendron</i>	20,2	17,9	19,0	18,0	21,3	20,4	33,7	26,1	28,9	31,4
<i>Nelumbo nucifera</i>	8,7	3,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	3,7	2,7
	1	1	1	1,6	3,4	8,7	6,2	2,7	1	3,8
<i>Silene vulgaris</i>	46,3	47,4	51,2	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
<i>Thalictrum flavum</i>	42,7	48,5	41,4	57,3	68,1	57,2	57,9	90,0	55,6	58,3
<i>Tropaeolum majus</i>	19,8	18,9	14,5	12,5	10,0	20,6	18,4	13,7	12,9	14,2
<i>Xanthosoma robustum</i>	5,9	7,4	8,6	8,4	8,2	9,4	8,8	8,1	6,7	7,4

Tab. E8: Ergebnisse der Abrollwinkelmessung mit Wasser bei pflanzlichen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 15°C

Pflanze	Abrollwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
<i>Alstroemeria aurantiaca</i>	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
<i>Apocynum cannabinum</i>	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
<i>Argemone mexicana</i>	13,8	45,8	39,8	18,8	26,9	53,6	33,1	29,2	29,0	43,3
<i>Brassica oleracea</i>	48,9	40,8	40,5	49,0	52,6	44,9	50,4	55,8	51,1	54,6
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	90,0	42,9	30,3	31,0	40,4	29,1	39,7	54,0	20,8	37,0
<i>Colocasia esculenta</i>	7,1	7,7	9,1	6,9	5,4	5,9	6,2	9,5	9,4	9,7
<i>Halimodendron halodendron</i>	42,5	43,0	44,7	35,4	90,0	41,6	90,0	90,0	90,0	90,0
<i>Nelumbo nucifera</i>	3,3	8,5	4,0	5,2	11,1	1,0	4,3	4,9	4,8	6,2
	1	9,8	5,4	2,9	6,3	4,7	7,4	5,9	5,1	8,2
<i>Silene vulgaris</i>	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
<i>Thalictrum flavum</i>	90,0	90,0	70,2	90,0	90,0	74,5	90,0	67,3	83,6	90,0
<i>Tropaeolum majus</i>	19,8	17,8	19,7	24,1	18,1	18,9	22,1	19,8	27,5	22,4
<i>Xanthosoma robustum</i>	10,8	9,0	14,8	10,4	11,5	11,4	8,0	9,3	12,1	12,4

Tab. E9: Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung mit Glycerin bei ausgewählten pflanzlichen Oberflächen unter isothermen Bedingungen

Pflanze	Kontaktwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	154,5	153,0	152,5	153,0	149,0	151,0	155,5	145,5	148,5	158,5
<i>Brassica oleracea</i>	158,5	158,0	159,5	149,5	158,5	155,0	155,0	152,5	158,0	149,5
<i>Colocasia esculenta</i>	158,5	155,5	158,5	160,0	156,5	160,0	157,0	161,0	162,0	156,0
<i>Tropaeolum majus</i>	151,5	159,0	158,0	162,0	164,0	149,5	159,5	155,5	161,5	159,0
<i>Xanthosoma robustum</i>	154,5	158,0	160,0	159,5	157,0	162,5	155,0	159,0	152,0	161,5

Pflanze	Abrollwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	15,1	14,8	17,2	16,8	18,1	16,4	16,0	17,6	15,7	15,9
<i>Brassica oleracea</i>	3,7	5,4	3,1	5,1	3,1	4,0	1,7	4,7	3,8	5,8
<i>Colocasia esculenta</i>	1,5	2,9	2,0	1,1	1,3	2,7	2,3	2,8	4,4	4,2
<i>Tropaeolum majus</i>	3,3	4,5	2,1	4,7	3,1	3,8	4,9	1,9	4,2	2,8
<i>Xanthosoma robustum</i>	6,5	5,6	4,9	2,1	5,1	7,3	2,8	6,0	3,3	3,1

Tab. E10: Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung mit Glycerin bei ausgewählten pflanzlichen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 5°C

Pflanze	Kontaktwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	143,0	152,5	145,5	144,5	148,5	148,0	152,0	151,5	144,5	152,5
<i>Brassica oleracea</i>	161,0	152,5	156,5	159,0	158,0	158,5	146,5	146,5	161,5	144,5
<i>Colocasia esculenta</i>	159,0	157,0	159,5	162,0	160,0	158,5	152,0	161,0	159,5	158,0
<i>Tropaeolum majus</i>	151,5	155,0	156,0	162,0	158,5	158,0	158,0	161,0	156,5	152,0
<i>Xanthosoma robustum</i>	156,0	158,5	159,0	156,0	154,0	160,0	152,5	155,0	156,5	156,5

Pflanze	Abrollwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	15,6	16,3	13,9	16,6	16,8	14,3	15,8	15,1	14,5	16,1
<i>Brassica oleracea</i>	3,1	1,9	2,9	3,5	3,1	3,4	4,5	3,6	2,1	4,5
<i>Colocasia esculenta</i>	2,9	3,5	4,3	2,2	3,8	1,8	1,7	3,3	2,4	2,5
<i>Tropaeolum majus</i>	4,2	4,0	3,5	2,7	2,4	3,6	5,0	7,5	4,0	6,3
<i>Xanthosoma robustum</i>	4,5	4,7	5,5	2,3	3,4	3,3	2,9	3,7	4,5	3,6

Tab. E11: Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung mit Glycerin bei ausgewählten pflanzlichen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 10°C

Pflanze	Kontaktwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	140,5	147,0	141,5	154,5	153,5	150,0	148,0	141,5	151,5	147,0
<i>Brassica oleracea</i>	152,0	156,5	154,5	157,0	156,0	154,0	156,5	159,5	155,5	162,0
<i>Colocasia esculenta</i>	158,0	161,0	159,5	161,5	159,0	158,5	157,5	159,0	157,5	163,5
<i>Tropaeolum majus</i>	145,5	154,5	153,5	153,0	153,5	159,0	160,5	154,0	160,5	158,5
<i>Xanthosoma robustum</i>	151,5	156,0	155,0	158,0	156,0	156,5	161,5	155,5	151,0	153,5

Pflanze	Abrollwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	15,8	16,1	16,0	16,8	15,9	16,5	16,3	15,3	15,4	16,1
<i>Brassica oleracea</i>	3,9	3,1	2,0	4,5	5,9	3,1	3,2	6,5	3,9	4,5
<i>Colocasia esculenta</i>	3,4	3,7	4,2	5,0	1,5	4,4	1,9	3,4	2,3	3,4
<i>Tropaeolum majus</i>	3,2	6,4	6,8	6,6	5,6	5,2	4,1	5,4	5,9	4,5
<i>Xanthosoma robustum</i>	6,4	5,2	5,6	4,7	2,8	4,3	5,5	6,0	5,7	4,4

Tab. E12: Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung mit Glycerin bei ausgewählten pflanzlichen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 15°C

Pflanze	Kontaktwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	143,0	143,5	154,0	148,5	137,5	144,5	150,0	154,0	150,0	144,5
<i>Brassica oleracea</i>	153,0	158,0	156,0	155,5	156,5	162,0	151,0	158,0	157,0	154,5
<i>Colocasia esculenta</i>	158,5	154,5	159,0	158,5	157,0	161,0	163,5	158,0	157,5	157,0
<i>Tropaeolum majus</i>	156,5	150,5	156,5	153,5	149,0	155,0	152,5	145,5	158,0	159,0
<i>Xanthosoma robustum</i>	157,5	152,0	155,5	154,0	154,5	151,5	156,0	158,0	148,0	151,5

Pflanze	Abrollwinkel [°]									
<i>Alocasia macrorrhiza</i>	15,6	16,4	16,0	16,3	17,1	17,4	16,7	16,0	16,7	15,9
<i>Brassica oleracea</i>	2,6	4,2	5,1	2,2	4,0	2,3	3,2	5,4	2,8	4,8
<i>Colocasia esculenta</i>	3,6	4,0	3,3	5,2	5,1	3,0	3,7	3,1	3,9	2,9
<i>Tropaeolum majus</i>	6,5	7,0	8,6	5,4	7,4	10,0	7,3	4,2	7,2	7,8
<i>Xanthosoma robustum</i>	5,8	3,4	4,7	2,3	3,5	6,5	2,9	3,5	4,1	3,3

Tab. E13: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung mit Wasser bei technischen Oberflächen unter isothermen Bedingungen

Oberfläche	Kontaktwinkel [°]									
Circuit foil	164,0	163,5	161,5	161,5	163,5	165,0	164,0	164,0	163,5	162,0
Bolta Folie	164,5	163,5	164,0	164,0	164,5	165,0	163,0	163,5	163,0	166,0
Creavis-Spray	165,5	167,0	167,0	164,5	165,0	166,5	164,0	165,0	167,0	165,5
Mincor-Spray	165,0	163,0	162,0	164,5	160,5	162,0	163,0	165,5	164,0	165,5

Tab. E14: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung mit Wasser bei technischen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 5°C

Oberfläche	Kontaktwinkel [°]									
Circuit foil	147,0	140,5	146,0	147,0	145,5	150,5	144,5	139,5	144,0	149,5
Bolta Folie	159,0	156,5	159,0	156,5	156,0	158,0	159,5	154,0	158,5	159,0
Creavis-Spray	155,0	160,5	162,0	161,0	160,0	159,0	161,0	158,5	158,0	160,5
Mincor-Spray	156,5	161,5	159,5	160,0	160,5	160,0	155,5	159,5	160,0	159,5

Tab. E15: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung mit Wasser bei technischen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 10°C

Oberfläche	Kontaktwinkel [°]									
Circuit foil	131,5	130,0	126,5	135,0	132,0	131,5	128,5	130,0	129,0	134,5
Bolta Folie	153,5	155,5	152,0	151,0	154,0	148,5	150,5	152,0	153,0	151,5
Creavis-Spray	159,0	155,0	153,5	155,0	159,0	154,0	152,0	154,5	154,0	155,0
Mincor-Spray	157,0	158,5	157,5	155,5	160,0	156,0	156,0	154,0	153,5	157,5

Tab. E16: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung mit Wasser bei technischen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 15°C

Oberfläche	Kontaktwinkel [°]									
Circuit foil	125,5	126,5	131,5	125,5	127,0	124,0	126,0	132,0	127,0	125,5
Bolta Folie	154,0	149,0	155,5	156,5	152,5	150,0	151,0	155,0	150,5	149,0

Creavis-Spray	152,0	153,5	153,0	141,5	152,5	154,5	150,0	150,5	153,0	153,0
Mincor-Spray	146,0	144,5	149,5	143,0	149,5	140,5	148,5	143,0	143,0	146,0

Tab. E17: Ergebnisse der Abrollwinkelmessung mit Wasser bei technischen Oberflächen unter isothermen Bedingungen

Oberfläche	Abrollwinkel [°]									
	Circuit foil	7,2	9,1	8,8	10,4	7,2	7,2	7,3	7,2	10,2
Bolta Folie	1,8	1,2	1,6	2,0	1,7	1,5	2,0	2,0	1,4	1,8
Creavis-Spray	0,7	0,6	1,2	0,8	0,6	0,5	0,6	0,9	0,8	0,7
Mincor-Spray	5,1	6,4	5,2	8,0	5,0	3,1	2,4	2,3	3,1	6,8

Tab. E18: Ergebnisse der Abrollwinkelmessung mit Wasser bei technischen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 5°C

Oberfläche	Abrollwinkel [°]									
	Circuit foil	45,6	57,3	90,0	90,0	78,0	62,1	61,3	50,9	60,6
Bolta Folie	3,9	4,7	3,9	4,4	3,6	4,7	3,7	3,8	3,5	4,5
Creavis-Spray	1,2	1,2	1,1	0,9	1,2	1,3	1,0	1,6	0,9	1,3
Mincor-Spray	12,1	10,9	9,6	9,6	6,5	8,7	7,9	11,3	8,5	9,3

Tab. E19: Ergebnisse der Abrollwinkelmessung mit Wasser bei technischen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 10°C

Oberfläche	Abrollwinkel [°]									
	Circuit foil	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
Bolta Folie	6,6	7,4	6,1	7,1	7,0	6,7	6,7	6,6	7,4	6,4
Creavis-Spray	2,3	5,2	1,6	6,5	2,7	6,1	2,6	1,2	1,3	2,5
Mincor-Spray	21,3	22,2	17,3	12,6	14,8	18,3	13,0	13,3	16,2	12,9

Tab. E20: Ergebnisse der Abrollwinkelmessung mit Wasser bei technischen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 15°C

Oberfläche	Abrollwinkel [°]									
	Circuit foil	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
Bolta Folie	9,6	10,3	10,2	10,6	8,3	9,3	9,7	9,8	10,1	10,9
Creavis-Spray	2,4	6,6	2,7	5,9	2,3	2,3	1,3	12,2	11,2	2,5
Mincor-Spray	31,5	34,2	30,2	28,2	32,8	27,5	38,2	35,1	33,1	35,7

Tab. E21: Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung mit Glycerin bei technischen Oberflächen unter isothermen Bedingungen

Oberfläche	Kontaktwinkel [°]									
	Circuit foil	162,5	165,5	166,5	166,0	163,5	156,0	165,5	155,5	162,5
Bolta Folie	163,0	159,0	161,5	164,0	162,0	163,0	163,0	163,5	163,0	160,5
Creavis-Spray	167,0	163,5	160,5	164,0	163,0	160,0	159,5	158,0	162,5	163,5
Mincor-Spray	160,5	164,0	163,5	161,0	162,0	163,0	155,0	156,5	163,0	162,0

Oberfläche	Abrollwinkel [°]									
	Circuit foil	4,7	5,2	3,5	3,1	7,8	7,8	5,8	3,8	6,5
Bolta Folie	1,6	1,3	1,8	2,1	1,6	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0
Creavis-Spray	1,6	2,8	2,6	1,6	1,2	2,0	2,0	1,0	1,7	2,2
Mincor-Spray	33,1	19,3	23,7	19,6	22,6	26,4	24,5	23,6	21,5	19,8

Tab. E22: Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung mit Glycerin bei technischen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 5°C

Oberfläche	Kontaktwinkel [°]									
	Circuit foil	160,5	161,0	159,5	159,0	164,0	160,0	162,5	162,5	159,5
Bolta Folie	163,0	160,5	162,5	160,0	160,5	162,5	161,0	160,0	160,0	158,5
Creavis-Spray	163,0	162,0	163,5	160,0	162,0	156,0	160,5	162,0	163,0	163,0
Mincor-Spray	158,0	160,5	161,0	158,5	163,5	156,5	160,5	162,5	162,0	161,5

Oberfläche	Abrollwinkel [°]									
	Circuit foil	7,5	6,8	7,6	7,3	7,8	6,7	5,9	6,3	6,8
Bolta Folie	2,2	3,1	1,4	1,6	1,9	2,2	1,5	1,4	1,9	1,6
Creavis-Spray	1,8	1,9	1,5	2,1	1,4	1,3	1,8	2,2	1,9	2,1
Mincor-Spray	22,3	26,5	20,1	23,8	23,5	19,9	17,4	26,3	19,4	24,0

Tab. E23: Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung mit Glycerin bei technischen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 10°C

Oberfläche	Kontaktwinkel [°]									
	Circuit foil	161,0	160,5	159,0	165,0	163,5	161,5	162,5	158,5	161,0
Bolta Folie	160,5	157,0	159,0	158,0	158,5	162,0	158,0	159,0	161,0	162,0
Creavis-Spray	159,5	160,0	156,0	161,5	163,0	160,5	162,5	157,5	159,0	159,5
Mincor-Spray	162,5	159,0	159,5	154,5	162,0	161,0	160,0	162,5	156,0	162,5

Oberfläche	Abrollwinkel [°]									
	Circuit foil	7,1	6,9	8,3	5,6	6,9	5,7	6,1	5,8	6,1
Bolta Folie	3,3	1,9	2,6	3,6	2,5	2,3	1,7	3,5	1,5	2,9
Creavis-Spray	1,2	2,6	1,2	1,6	2,0	3,8	1,4	2,6	1,5	1,6
Mincor-Spray	30,0	21,7	27,6	27,9	30,1	22,3	23,9	28,6	24,1	20,9

Tab. E24: Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung mit Glycerin bei technischen Oberflächen bei Kühlung der Oberfläche um 15°C

Oberfläche	Kontaktwinkel [°]									
	Circuit foil	159,5	161,0	157,0	160,0	160,5	159,5	158,5	162,5	164,0
Bolta Folie	158,0	160,5	161,0	160,0	158,5	158,0	162,0	159,0	159,5	161,0
Creavis-Spray	161,0	159,0	160,0	161,0	159,5	158,5	158,5	160,0	161,0	164,0
Mincor-Spray	162,5	161,0	156,5	159,5	160,5	162,5	160,5	160,0	156,0	156,5

Oberfläche	Abrollwinkel [°]									
	Circuit foil	9,1	6,2	6,7	4,2	6,4	7,8	6,5	6,3	7,1
Bolta Folie	3,2	3,3	2,7	3,0	2,8	3,2	3,3	2,6	2,9	3,0
Creavis-Spray	1,6	1,7	1,6	2,9	1,5	3,4	1,3	2,7	2,5	1,9
Mincor-Spray	23,6	15,9	24,5	28,2	20,1	24,3	29,7	22,9	18,2	21,6

Tab. E25: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf einer um 15°C gekühlten Oberfläche von *Colocasia esculenta* im Verlauf der Zeit

Colocasia esculenta (n=10)										
	Kontaktwinkel [°]									
Zeit [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	155,7	-	161,8	164,6	-	-	171,7	162,6	156,5	157,7
15	165,2	158,1	155,6	159,4	154,7	162,5	163,1	161,2	151,3	159,3
25	160,5	159,9	153,4	155,9	152,5	161,4	160,9	154,8	149,8	158,1
35	160,5	158,0	153,0	155,7	149,6	159,5	157,9	153,4	149,2	151,9
45	156,5	159,4	151,4	154,9	148,9	159,9	157,9	153,2	148,1	151,2
55	158,5	158,6	152,7	154,1	148,6	157,3	157,0	151,9	147,7	155,6
65	158,5	157,1	152,5	154,1	149,8	157,0	155,4	153,3	148,1	149,5
75	159,6	155,8	151,9	154,4	149,4	157,0	155,2	151,4	148,0	149,1
85	159,9	153,5	151,7	164,0	149,3	156,8	155,2	153,5	147,0	149,1
95	159,6	155,9	151,2	154,0	148,4	156,6	157,3	151,3	146,8	149,0
105	160,6	155,2	150,9	154,1	148,5	156,8	158,0	152,2	146,7	147,5
115	160,6	155,9	150,9	154,3	148,6	156,3	158,4	152,3	146,9	148,0
125	161,7	154,8	149,6	154,0	148,5	155,5	157,8	152,4	146,7	148,9
135	160,2	153,8	150,2	153,4	148,2	155,0	158,4	154,1	146,4	148,3
145	160,6	153,2	149,6	153,0	148,3	154,1	158,4	152,5	147,5	146,8
155	158,5	152,9	150,2	153,8	147,8	154,1	158,4	151,5	145,8	146,6
165	162,6	152,8	149,8	152,1	147,6	154,5	158,5	151,5	146,2	145,9
175	159,7	152,9	150,3	152,3	147,6	153,3	156,1	150,2	144,9	144,9

Tab. E25: Änderung der Tropfentemperatur (Wasser) auf einer um 15°C kühleren Oberfläche von *Colocasia esculenta* im Verlauf der Zeit (ermittelt mittels Thermographie)

Zeit [s]	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Tropfentemperatur [°C]	22,2	20,4	18,7	17,3	16,0	14,9	13,9	13,1	12,7	12,1	11,6	11,3	11,0	10,9	10,6
Zeit [s]	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	
Tropfentemperatur [°C]	10,4	10,1	9,9	9,8	9,7	9,6	9,5	9,6	9,7	9,7	9,6	9,6	9,6	9,4	

Tab. E26: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf einer um -5°C gekühlten Oberfläche von *Alocasia macrorrhiza* im Verlauf der Zeit

Alocasia macrorrhiza (n=7)							
	Kontaktwinkel [°]						
Zeit [s]	1	2	3	4	5	6	7
5	148,5	149,0	150,0	149,0	146,5	147,0	145,5
10	145,5	145,0	145,5	146,5	145,0	145,5	143,5
20	144,5	144,5	144,0	144,5	142,0	141,0	141,0
30	141,5	142,5	142,0	143,0	139,5	136,5	138,5
40	139,5	143,0	142,0	142,5	138,0	136,0	138,0
50	139,5	143,0	141,5	141,5	137,5	135,5	137,0
60	139,5	143,0	142,0	142,0	137,5	134,5	136,0
120	139,0	143,0	142,0	141,5	135,5	135,0	136,5
180	139,0	142,5	142,0	141,5	134,0	134,0	135,5
240	139,0	142,5	142,0	141,5	134,0	133,5	135,5
300	138,0	142,5	141,0	140,5	135,0	133,5	135,5

420	138,0	141,5	140,5	140,5	134,0	133,0	134,5
600	137,0	141,5	139,5	140,5	134,0	132,0	134,0

Tab. E27: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf einer um 15°C gekühlten Oberfläche von *Alocasia macrorrhiza* im Verlauf der Zeit

<i>Alocasia macrorrhiza</i> (n=9)									
	Kontaktwinkel [°]								
Zeit [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	126,0	133,0	143,0	135,5	139,5	142,5	140,5	138,5	138,0
10	119,0	127,5	136,0	125,0	133,5	134,5	130,0	132,0	131,0
20	116,5	123,0	132,0	123,0	126,5	126,5	124,5	128,5	127,0
30	115,5	121,0	130,0	122,0	124,0	125,0	122,0	128,0	125,5
40	116,5	120,5	128,5	123,5	122,5	122,5	120,5	126,0	123,5
50	114,5	120,5	124,5	123,0	121,5	121,5	120,5	124,0	120,5
60	112,5	120,0	125,0	121,5	120,5	120,5	120,0	123,5	120,0
120	112,5	116,5	121,5	-	118,0	-	115,0	120,5	119,0
180	109,5	116,5	119,0	-	118,0	-	114,5	118,0	115,0
240	106,5	113,5	117,0	-	115,5	-	114,0	118,0	114,0
300	104,0	112,5	114,0	-	114,5	-	113,0	113,0	112,0
420	104,5	108,5	112,5	-	112,0	-	111,0	111,5	112,0
600	-	107,0	112,0	-	111,0	-	111,0	110,0	110,5

Tab. E28: Änderung der Tropfentemperatur (Wasser) auf einer um 5°C kühleren Oberfläche von *Alocasia macrorrhiza* im Verlauf der Zeit (ermittelt mittels Thermographie)

Zeit [s]	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Tropfentemperatur [°C]	21,2	-	20,2	19,9	19,4	19,2	18,8	18,6	18,3	18,1	17,9	17,8	17,6	17,5	17,3
Zeit [s]	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Tropfentemperatur [°C]	17,3	17,1	17	16,9	16,9	16,8	16,7	16,7	16,6	16,6	16,5	16,4	16,5	16,4	16,4
Zeit [s]	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82			
Tropfentemperatur [°C]	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3			

Tab. E29: Änderung der Tropfentemperatur (Wasser) auf einer um 5°C kühleren Oberfläche von *Alocasia macrorrhiza* im Verlauf der Zeit (ermittelt mittels Thermographie)

Zeit [s]	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	29
Tropfentemperatur [°C]	19,3	18,5	17,4	15,9	14,9	14,0	13,2	12,6	12	11,4	11	10,6	10,2	9,87	9,69
Zeit [s]	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	52	54	56	58	60
Tropfentemperatur [°C]	9,37	9,15	8,97	8,8	8,68	8,57	8,42	8,31	8,3	8,22	8,19	8,13	8,1	8,03	7,95
Zeit [s]	62	64	66	69	71	73	75	77	79	81	83				
Tropfentemperatur [°C]	7,9	7,94	7,91	7,82	7,77	7,78	7,78	7,75	7,78	7,73	7,67				

Tab. E30: Änderung des Kontaktwinkels von Wasser auf einer um 15°C gekühlten Oberfläche von Bolta Folie im Verlauf der Zeit

Bolta Folie (n=10)										
	Kontaktwinkel [°]									
Zeit [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	174,9	155,6	170,4	155,2	166,4	165,1	164,3	148,7	148,9	155,5
15	169,3	143,6	169,1	167,6	161,6	161,2	160,9	147,7	146,0	147,5
25	167,3	140,6	169,4	-	-	158,6	161,4	126,7	146,7	145,6
35	166,7	139,3	166,1	168,4	159,6	157,4	160,4	146,0	144,9	143,9
45	168,6	138,0	166,6	166,8	159,2	158,2	160,3	146,4	145,2	143,6
55	167,3	138,1	165,3	164,1	159,6	159,8	160,3	145,7	144,2	143,5
65	165,2	138,1	164,9	166,0	158,2	157,6	160,0	151,0	145,3	143,4
75	164,0	136,4	166,4	163,1	158,1	156,9	159,9	146,4	145,2	142,9
85	165,5	135,1	163,3	164,3	159,5	157,1	159,8	146,4	144,8	142,7
95	164,5	135,2	160,3	164,8	-	157,5	-	145,6	145,5	142,7
105	163,5	134,2	162,6	163,8	158,1	157,6	-	145,5	145,5	142,2
115	166,6	133,8	162,0	172,1	157,5	157,4	158,4	150,7	145,8	140,2
125	165,3	134,0	164,2	161,6	157,8	155,8	158,1	145,4	145,6	140,2
135	165,3	132,3	162,3	163,9	157,4	155,9	159,0	145,4	145,1	139,0
145	163,5	132,8	162,1	172,5	158,9	155,1	157,9	146,0	145,7	139,2
155	166,4	132,5	161,2	162,1	157,9	156,8	157,9	150,7	144,7	138,5
165	163,5	132,7	162,0	162,9	157,8	155,6	157,9	146,2	145,0	138,7
175	164,5	132,1	160,9	163,7	156,6	155,2	158,1	145,9	144,7	-

Tab. E31: Änderung der Tropfentemperatur (Wasser) auf einer um 15°C kühleren Oberfläche von Bolta Folie im Verlauf der Zeit (ermittelt mittels Thermographie)

Zeit [s]	3	5	8	11	14	17	19	22	25	28	30	33	36	39	42
Tropfentemperatur [°C]	19,6	17,2	15,7	14,2	13,0	12,1	11,5	11,0	10,6	10,2	9,9	9,7	9,5	9,2	9,1
Zeit [s]	45	47	50	53	56	59	62	65	68	71	74	77	80	83	87
Tropfentemperatur [°C]	9,11	9,01	8,88	8,89	8,9	8,89	8,9	8,92	8,75	8,7	8,77	8,75	8,66	8,76	8,68
Zeit [s]	90	93	96	99	102	105	108	112	115	118	121	125	128	131	135
Tropfentemperatur [°C]	8,64	8,7	8,72	8,7	8,73	8,76	8,75	8,84	8,7	8,58	8,61	8,55	8,52	8,5	8,69
Zeit [s]	139	142	145	149	152	156	159								
Tropfentemperatur [°C]	8,65	8,68	8,57	8,69	8,55	8,59	8,57								