

FARBE UND LACK EDITION



Stefan Sepour

Nanotechnologie



Vincentz Network GmbH & Co KG

Stefan Sepeur

Nora Laryea

Stefan Goedicke

Frank Groß

Nanotechnologie

Grundlagen und Anwendungen

Umschlagbild: NANO-X GmbH, Saarbrücken

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Stefan Sepeur
Nanotechnologie: Grundlagen und Anwendungen
Hannover: Vincentz Network, 2008
(Farbe und Lack Edition)
ISBN 3-87870-333-3
ISBN 978-3-87870-333-4

© 2008 Vincentz Network GmbH & Co. KG, Hannover
Vincentz Network, P.O. Box 6247, 30062 Hannover, Germany
Das Werk einschließlich seiner Einzelbeiträge und Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urhebergesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar.
Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Das Verlagsverzeichnis schickt Ihnen gern:
Vincentz Network, Plathnerstr. 4c, 30175 Hannover, Germany
Tel. +49 511 9910-033, Fax +49 511 9910-029
e-Mail: books@coatings.de, www.coatings.de

Satz: Maxbauer & Maxbauer, Hannover
Druck: Quensen Druck & Verlag GmbH & Co. KG, Lamspringe

ISBN 3-87870-333-3
ISBN 978-3-87870-333-4

Das Netzwerk der Branche

www.farbeundlack.de



FARBE UND LACK

ONLINE
ZEITSCHRIFT
BÜCHER
VERANSTALTUNGEN



VINCENTZ



Auf ein Wort

Sie halten unser Buch zur chemischen Nanotechnologie in Händen. „Nanotechnologie“ – ein Begriff, der anscheinend eine Vielzahl von Emotionen weckt. In unserem beruflichen Umfeld stehen wir täglich mit Menschen in Kontakt, die eine Problemlösung durch Nanotechnologie suchen. Viele

davon haben bereits Ihre ersten Erfahrungen mit so genannten „Nanoschichten“ gesammelt, andere kennen Begriffe wie „Lotus“-Effekt oder „Easy to Clean“-Beschichtungen. Meistens sind in der vorhandenen Literatur immer nur Teilbereiche der Möglichkeiten, die uns die moderne Nanotechnologie liefert, beschrieben.

Dieses Buch gibt einen Überblick über alle wichtigen Felder der chemischen Nanotechnologie. Wir haben dabei nicht den Anspruch, in allen Bereichen den Leser mit jeder Detailinformation zu versorgen, vielmehr wollen wir einen strukturierten Überblick über alle Facetten dieser modernen Technologie geben. Der Leser versteht nach der Lektüre dieses Buches, welche Vielfalt und welche Möglichkeiten uns die moderne Nanotechnologie bietet. Den technischen Hintergrund für die meisten Anwendungen der chemischen Nanotechnologie bietet die Silan-Chemie. Mit Hilfe der Silane lassen sich die Einsatzmöglichkeiten in sechs Stufen einteilen. Von der Kieselzol-Herstellung bis zu komplexen nanopartikulär gefüllten Materialien als multifunktionelle Beschichtungen – der Zusammenhang ist in vielen Bereichen offensichtlich. Entsprechend dieser Reaktionsabfolgen ist auch die Gliederung des Buches. Beginnend mit einfachen Sol-Gel-Reaktionen und der Herstellung von Silica-Partikeln nehmen wir Anleihen aus der Glaschemie, der Silikonchemie und der Festkörperchemie, um den Leser immer weiter und Schritt für Schritt zu den komplexeren Reaktionen der anorganisch-organischen Nanokomposite zu führen. Reaktionsmechanismen der modernen Polymerchemie und die wichtigsten Charakterisierungsmethoden sind Thema des Buches.

Wenn möglich sind in allen Kapiteln Anwendungsbeispiele aufgezeigt, die Ihnen als Leser demonstrieren, dass diese teils sehr einfachen, teils auch komplexen Materialien bereits Teil unseres täglichen Lebens sind.

Wir hoffen, Ihnen mit diesem Buch die Faszination zu vermitteln, die die chemische Nanotechnologie ausübt. Der Forscher, der sich mit diesen Materialien beschäftigt, wird täglich neue Zusammenhänge begreifen und Lösungen finden, die bisher undenkbar schienen. Wir wünschen Ihnen viel Freude auf der Entdeckungsreise in den Nanokosmos.

Saarbrücken, Januar 2008

Stefan Sepeur

Nora Laryea

Stefan Goedicke

Frank Groß

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die chemische Nanotechnologie.....	13
2	Definition der Nanotechnologie	16
2.1	Allgemeine Definition der Nanotechnologie.....	17
2.2	Definition der „Chemischen Nanotechnologie“	17
2.3	Nanotechnologie für den Bereich Farben und Lacke	17
3	Silan-Technologie als Schlüssel zur chemischen Nanotechnologie.....	22
3.1	Hydrolyse und Kondensation von Silanen (Grundlagen des „Sol-Gel-Prozesses“)	25
3.2	Netzwerkwanlder zur Flexibilisierung des anorganischen Netzwerkes.....	31
3.3	Co-Kondensation von Metallalkoxiden ins Si-O-Si-Netzwerk.....	34
3.4	Einstellung von Oberflächeneffekten.....	40
3.4.1	Hydrophobe Oberflächen oder der „Easy to Clean“-Effekt	43
3.4.2	Superhydrophobe Oberflächen oder der „Lotus“-Effekt	48
3.4.3	Hydrophile Oberflächen oder der Antibeslag-Effekt	51
3.4.4	Superhydrophile Oberflächen	54
3.5	Herstellung und Modifizierung von Nanopartikeln	57
3.5.1	Herstellung von Nanopartikeln.....	58
3.5.1.1	Top Down: Kugelmahlen.....	58
3.5.1.2	Bottom Up: Herstellung aus der Gasphase.....	59
3.5.1.3	Bottom Up: „Aerosil“-Verfahren.....	60
3.5.1.4	Bottom Up: Chemische Fällung	62
3.5.1.5	Bottom Up: Sol-Gel-Prozess	62
3.5.1.6	Bottom Up: Mikroemulsionsverfahren.....	63
3.5.2	Oberflächenmodifizierung von Nanopartikeln	64
3.5.2.1	Stabilisierung von Nanopartikeln	64
3.5.2.2	Sonderfall Silanisierung	66
3.5.3	Charakterisierung von Nanopartikeln.....	66
3.5.3.1	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	67
3.5.3.2	EDX-Analyse	67
3.5.3.3	Röntgendiffraktometrie (XRD)	68
3.5.3.4	BET-Oberflächenbestimmung	70

3.5.3.5	Photonenkorrelationspektroskopie (PCS).....	71
3.5.3.6	Röntgenkleinwinkelstreuung (SAXS).....	72
3.5.4	Anwendungen von Nanopartikeln für Beschichtungs- materialien	73
3.5.4.1	SiO ₂ -Nanopartikel	73
3.5.4.2	TiO ₂ -Nanopartikel	76
3.5.4.3	TiO ₂ -Rutil für den UV-Schutz	78
3.5.4.4	TiO ₂ -Anatas für fotokatalytische Effekte	79
3.5.4.5	Vergleich zwischen „Catalytic Clean“-Effekt und „Lotus“-Effekt	81
3.5.4.6	Nanopartikel für Dieselrußfilter	84
3.5.4.7	Thermische Zersetzung durch Nanopartikel	87
3.5.4.8	CeO ₂ - und ZrO ₂ -Nanopartikel	88
3.5.4.9	Kohlenstoffnanoröhrchen oder Carbon Nanotubes	89
3.5.5	Antibakterielle Effekte	92
3.5.5.1	Silberverbindungen für antibakterielle Beschichtungen	93
3.5.5.2	Chitosan für bakterienabweisende Beschichtungen	95
3.6	Funktionelle organische Netzwerkbildner	98
3.6.1	Reaktionen des 3-Glycidyoxypropyltrialkoxysilan.....	100
3.6.1.1	Organische Polymerisation des 3-Glycidyoxypropyltri- alkoxysilanes	100
3.6.1.2	Organische Additionsreaktionen des 3-Glycidyoxypropyl- trialkoxysilanes.....	102
3.6.1.3	Einkondensation von Nanopartikeln	108
3.6.1.4	Hydrolyse von 3-Glycidyoxypropyltrialkoxysilanen	112
3.6.1.5	Variation der Wassermenge	113
3.6.1.6	Variation der Hydrolysezeit	116
3.6.1.7	²⁹ Si-NMR-spektroskopische Untersuchungen.....	117
3.6.2	Reaktionen von 3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan (MPTS).....	122
3.6.2.1	Anorganische Modifizierung mit Böhmit-Nanopartikel.....	123
3.6.2.2	Untersuchung der Viskosität.....	124
3.6.2.3	Untersuchung des Temperaturverlaufes	125
3.6.2.4	Untersuchungen zum pH-Wert	125
3.6.2.5	Modell der Partikelstabilisierung	127
3.6.2.6	Charakterisierung durch die Transmissionselektronen- mikroskopie (TEM)	128
3.6.2.7	Charakterisierung über Karl-Fischer-Titration	129
3.6.2.8	Charakterisierung über die ²⁹ Si-NMR-Spektroskopie.....	130
3.6.2.9	Charakterisierung der organischen Vernetzung über FTIR- und Foto-DSC Messungen	134

3.6.2.10	Einfluss der Böhmit-Konzentration auf die radikalische Vernetzung	137
3.6.2.11	Polymerisationsmechanismen und Fotoinitiatoren.....	139
3.6.2.12	Flexibilisierung von MPTS/Böhmit über organische Co-Polymerisation	142
3.6.2.13	Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften	144
3.6.2.14	Literaturbewertung zu Nanobeschichtungen auf Basis des MPTS	145
3.6.3	Das Fällungs-Emulsions-Verfahren.....	146
3.6.4	Neuartige Bindemittelklasse – die „Silixane“	151
3.6.5	Korrosionsschutz	158
3.6.5.1	Selbstorganisierende monomolekulare Schichten oder Self Assembling Monolayers (SAMs).....	157
3.6.5.2	Nanopartikel gefüllte Siloxan-Beschichtungen.....	158
3.6.5.3	Kathodischer Korrosionsschutz über nanopartikuläre Ansätze	160
3.6.6	Schutzbeschichtung für Stahl gegen Zunder bei der Warmumformung – Nanotechnologie kombiniert mit Lackchemie	162
4	Schlusswort – Zusammenfassung und Perspektiven.....	166
5	Literatur	168
	Abkürzungsverzeichnis.....	177
	Lebensläufe	179
	Index	180

ist durch die meisten Gewebe, wie Baumwolle, oder Polyester sowieso vorhanden, so dass man sehr einfach einen dem „Lotus“-Effekt-ähnlichen Effekt erhält.

Die Entwicklung geht hier in den Bereich Permanenz und Zusatzeffekte. Durch Sol-Gel- und nanotechnologische Modifizierungen ist es möglich beispielsweise die Waschpermanenz wesentlich zu verbessern. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang sind antibakterielle Eigenschaften (siehe Kap. 3.5.5).

Um den „Lotus“-Effekt zukünftig auch in anderen Anwendungsbereichen als der Fassade nutzbar zu machen, muss ähnlich wie beim echten Lotus- oder Kohlblatt ein Reparaturmechanismus in die Schichten eingebaut werden. Die Zukunft wird zeigen, inwieweit dies funktionieren wird.

3.4.3 Hydrophile Oberflächen oder Antibeschlag-Effekt

Das Gegenteil von Hydrophobie ist Hydrophilie. Das Wort hydrophil kommt aus dem Griechischen und bedeutet „wasserliebend“, was besagt, dass ein Stoff wasseranziehend ist. Hydrophile Oberflächen besitzen im Allgemeinen auch eine hohe Oberflächenenergie und sind von einem meist nicht sichtbaren Wasserfilm bedeckt. Üblicherweise sind Metalle oder eine frische Glasoberfläche hydrophil². Hydrophile Oberflächen haben gegenüber Wasser Kontaktwinkel, die kleiner sind als 15° . Tropfen sehen also von der Seite aus wie eine flache Kugelkappe. Kommen viele Tropfen gemeinsam auf die Oberfläche, wie es beispielsweise beim Beschlagen einer Glasscheibe der Fall ist, so laufen die Tropfen zusammen und bilden einen Wasserfilm. Dieser meistens sehr dünne Film ist optisch nicht wahrnehmbar und man erreicht einen Antibeschlageffekt (Abbildung 3-30).

Die ersten Antibeschlagsysteme und auch was man in den meisten sog. Antibeschlagtüchern findet, sind Monolayersysteme basierend auf Tensiden. Mit dem hydrophoben Ende haften sie sich an die Oberflächen, so dass das hydrophile Ende

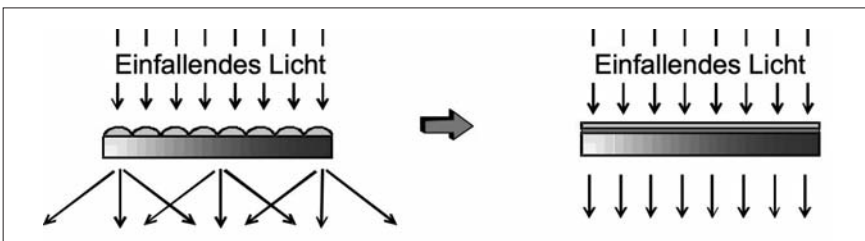


Abbildung 3-30: Kondensiert Wasserdampf auf einer normalen Glasoberfläche, so bilden sich kleine Wassertropfen, die das einfallende Licht streuen (linkes Bild). Auf einer hydrophil beschichteten Glasfläche bildet sich dagegen ein Wasserfilm, der das einfallende Licht ohne eine störende Streuung durchlässt (rechtes Bild)

2 Glas und Metalle neigen dazu organische Substanzen aus der Umgebungsluft zu adsorbieren. Da diese organischen Adsorbentien in der Regel hydrophob sind, werden auch die Glas- bzw. Metalloberflächen hydrophob.

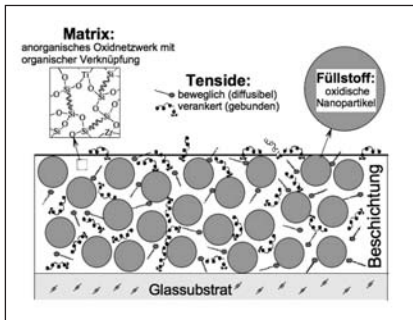


Abbildung 3-31: Schematischer Aufbau einer Hydrophilbeschichtung



Abbildung 3-32: Schutzbrille aus Kunststoff mit einer Antifogbeschichtung



Abbildung 3-33: Antibeschlagsystem für Streuscheiben

an der Grenzfläche zur Luft verbleibt. Die entstehenden Monolayer zeigen einen hervorragenden Antibeschlageffekt, der aber in der Regel keine Langzeitbeständigkeit zeigt.

Will man den Effekt verstärken und den Antibeschlageffekt verlängern, kommt die Nanotechnologie ins Spiel, bei so genannten diffusionskontrollierten Systemen. Nanopartikel bilden innere Oberflächen, d.h. während beim Aufreiben von Tensiden normalerweise nur die optisch sichtbare Oberfläche von diesen auch bedeckt werden kann, erhält man durch einen dickeren Schichtauftrag von mehreren μm und durch den Einbau von Nanopartikeln zusätzlich eine große innere Oberfläche, die als „Tensidspeicher“ genutzt werden kann. Durch flexible Tenside wird die Oberfläche aus der Matrix immer wieder mit hydrophilen Seitenketten belegt, die an die Oberfläche diffundieren können. Angebundene Tenside sorgen dafür, dass die Matrix selbst eine Grundhydrophilie besitzt (Abbildung 3-31).

Durch ständiges Abwaschen der Tenside beispielsweise in einem Wasserstrom, können solche Beschichtungen in der Wirkung nachlassen.

Neuere Ansätze arbeiten mit einer zusätzlichen nanostrukturierten Oberfläche, so dass der Sekundäreffekt nach Auswaschen der Tenside immer noch ausreichend ist und eine sehr dauerhafte

Wirkung erzeugt wird. Erreicht wird dies durch Vernetzen von hydrophilen Nanopartikeln^[61]. Anwendungsbereiche sind Tauch-, Ski- oder Schwimmbrillen, in Schutzbrillen und in Helmvisieren, im Innern von Objektiven und Linsen, optischen Sensoren und Displays, im Innern von Abdeckscheiben von Anzeigen und Messinstrumenten usw.

Ein Beispiel für eine Anwendung im Automobilbereich sind Antibeschlagssysteme für Streuscheiben. (Abbildung 3-33).

Die Beschichtung verhindert Beschlagen, wenn Feuchtigkeit in den Scheinwerfer eindringt und ist somit eine Sicherheitsmaßnahme für eine optimale Beleuchtung der Automobile zu jeder Jahreszeit.

Ein Problem von hydrophilen Oberflächen im praktischen Gebrauch ist das sog. „vergiften“ von Oberflächen, insbesondere im Außenbereich. Am besten kann man diesen Effekt am Beispiel Glas diskutieren.

Gläser bzw. Glasscheiben haben nach der Herstellung eine amorphe SiO_2 -Struktur. An der Grenzfläche Glas/Luft treten Störstellen auf, die sich durch freie Si-OH-Gruppen (Silanolgruppen) auf dem Glas absättigen. Dies führt zu einer hydrophilen Oberfläche. Doch wie sieht es in der Praxis aus? Setzt man sich bei einem beginnenden Regenschauer ins Auto, kann man jeden Tropfen sehr schön erkennen. Die Tropfen setzen sich einer nach dem anderen auf die Windschutzscheibe und verlaufen auch nicht, so dass man nach kurzer Zeit den Scheibenwischer betätigen muss, um wieder freie Sicht zu haben.

Die Kontaktwinkel dieser Tropfen liegen im Bereich 40 bis 60°, also keinesfalls im Bereich einer hydrophilen Oberfläche. Das rührt von kleinsten hydrophoben Partikeln und organischen Verbindungen aus der Luft, die sich auf der Scheibe niederschlagen bzw. dort adsorbieren. Treffen Abgasrückstände, Schmutz und Staub auf die frische Glasoberfläche, so können diese auf der hochenergetischen Oberfläche sehr gut physikalisch anhaften. Mit der Zeit bilden sich sogar kovalente Bindungen zwischen den Si-OH der Glasoberfläche und den freien OH-Gruppen dieser Verschmutzungen. Die Oberfläche ist damit „vergiftet“ und auch normalerweise nicht mehr so einfach in den Ausgangszustand zurückzusetzen. Bei langen Autofahrten im starken Regen bildet sich allmählich ein Wasserfilm und man kann auch ohne Scheibenwischer wieder verschwommen was erkennen. Dieser Effekt ist ähnlich wie der Antibeschlageffekt, nur braucht das Zusammenfließen der Tropfen auf der hydrophobierten angewinkelten Frontscheibe eine enorme Wassermenge, weshalb auch alles verschwommen wirkt. Eine hydrophile Oberfläche scheint unter gleichen Bedingungen transparent, weil die Tendenz des Wassers flächig abzulaufen wesentlich eher einsetzt. Um dauerhafte Hydrophileffekte auch unter Erhalt einer guten Kratz- und Abriebbeständigkeit zu erreichen, nutzt man ähnlich wie beim „Lotus“-Effekt einen physikalischen Ansatz. Man erreicht eine so genannte „Superhydrophilie“.



Abbildung 3-34: Blick durch eine mit Tropfen besetzte Windschutzscheibe eines PKWs

3.4.4 Superhydrophile Oberflächen

Seit Mitte der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts weiß man durch den „Lotus“-Effekt, wenn man hydrophobe Oberflächen mikro- und nanostrukturiert, steigen die Kontaktwinkel gegen Wasser von ca. 100° auf bis zu 170° an, und es stellt sich eine Selbstreinigung ein. Die Benetzung des Tropfens auf der Oberfläche wurde also auf ein Minimum reduziert. Die Probleme der Lotusstruktur wurden in Kapitel 3.4.2 ausreichend diskutiert und die Hemmnisse bei der praktischen Umsetzung werden dort dargelegt.

Aber was passiert, wenn eine hydrophile Oberfläche ähnlich strukturiert wird? Im Prinzip passiert nichts anderes als beim „Lotus“-Effekt, nur umgekehrt. Durch die höhere Oberfläche wird die partielle Wechselwirkung zwischen dem hydrophilen Wasser und der hydrophilen Oberfläche verstärkt. Es entsteht eine Erhöhung der OH-Gruppendichte pro Flächeneinheit, einfach dadurch, dass durch eine Nanostrukturierung die effektive Oberfläche gegenüber einer ganz glatten Oberfläche um ein Vielfaches erhöht ist.

Zur Erklärung des Effektes sei ein modellhaftes Beispiel gewählt. Dieses Beispiel ist sicherlich physikalisch nicht korrekt, erklärt aber auf einfachem Weg den Einfluss der Struktur:

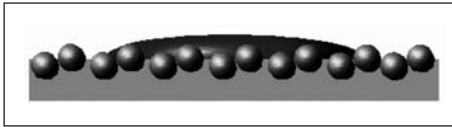


Abbildung 3-35: Schematische Darstellung einer hydrophilen Oberfläche mit einer Nanostrukturierung

Eine Modelloberfläche weist im glatten Zustand eine Oberflächenenergie auf, die einen aufliegenden Tropfen einer bestimmten Masse

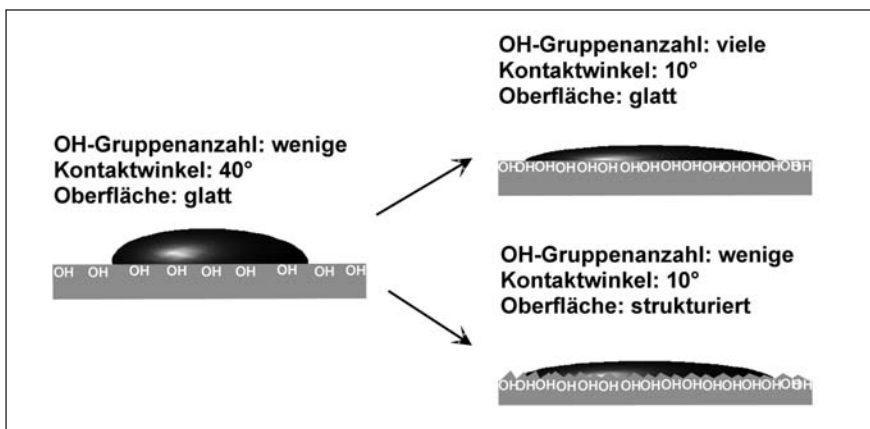


Abbildung 3-36: Kontaktwinkel auf einer einfach glatten Modelloberfläche (links). Veränderung des Kontaktwinkels durch Erhöhung der Zahl der hydrophilen Zentren (OH-Gruppenzahl, rechts-oben) sowie durch Strukturierung der Oberfläche (rechts-unten).

auf einen Kontaktwinkel von ca. 40° bringt. Um den Tropfen auf der gleichen glatten Oberfläche auf einen Kontaktwinkel von 10° zu bekommen, kann nun die Zahl der hydrophilen Zentren je Flächeneinheit (also im Modell die Zahl der OH-Gruppen) entsprechend erhöht werden, um die Oberflächenenergie zu erhöhen und somit den Tropfen stärker an die Oberfläche heranzuziehen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die OH-Gruppendichte der Schichtkontaktfläche konstant zu lassen, aber die Adsorptions- bzw. Kontaktfläche der Hydrophilschicht durch eine Nanostrukturierung zu vervielfachen. Mit Schichtkontaktfläche wird demnach also nicht die Fläche des makroskopisch betrachteten Substrates, sondern die integrierte Oberfläche der „nanoskopischen“ Schichtstruktur bezeichnet. Die Transparenz solcher nanostrukturierter Superhydrophilbeschichtungen bleibt aufgrund der nanoskaligen Strukturhöhen erhalten.

Makroskopisch tritt bei solchen superhydrophilen Oberflächen keine „Vergiftung“ mehr auf. Desweiteren ist ebenso wie beim „Lotus“-Effekt ein Selbstreinigungseffekt zu detektieren^[62]. Man bezeichnet dieses Phänomen auch als den inversen „Lotus“-Effekt. Technisch sind solche Hydrophiloberflächen wesentlich robuster als superhydrophobe Oberflächen.

Störungen im Effekt werden durch das spreitende Wasser meistens einfach überdeckt und funktionieren immer noch. Eine Aufkonzentration von Schmutz an Störstellen tritt nicht auf. Da keine Mikrometerstruktur notwendig ist, sondern eine Nanostrukturierung für den Effekt ausreicht, kann man transparente Schichten erzeugen und hat eine sehr hohe Abriebbeständigkeit.

Tenside und Reinigungsmittel stören nicht, sondern sie verstärken den Effekt bis sie aufgebraucht sind. Eine Anwendung im Innenbereich, beispielsweise auf Küchenfliesen oder bei Duschabtrennungen ist möglich. Auch auf Textilien zeigen superhydrophile Oberflächen insbesondere im Außenbereich viele Vorteile gegenüber hydrophoben Oberflächen (Abbildung 3-37).

Abbildung 3-37 zeigt eine deutlich sichtbare Vergrauung des nicht imprägnierten Gewebes gegenüber dem imprägnierten Gewebe mit superhydrophiler Ausrüstung.

Wie genau diese Effekte bei superhydrophilen Oberflächen funktionieren, ist derzeit noch nicht vollständig geklärt, aber der Einfluss der Struktur auf die Reinigung mit Regen ist anhand vieler Demonstratoren zweifelsfrei nachgewiesen.

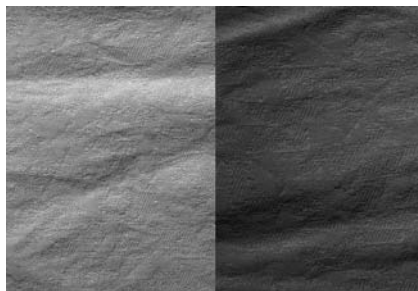


Abbildung 3-37: Imprägniertes Baumwollgewebe mit superhydrophiler Beschichtung nach 4 Monaten Außenbewitterung (links), nicht imprägniertes Baumwollgewebe nach 4 Monaten Außenbewitterung (rechts)

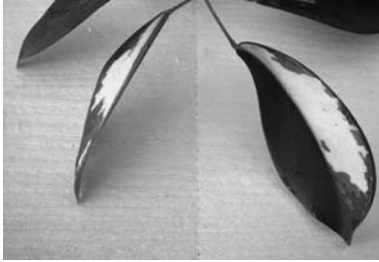


Abbildung 3-38: Weißer Acrylfarblack mit einer superhydrophilen Decklackierung auf der rechten Seite. Der ungeschützte, hydrophobe Acrylack (links) verschmutzt in der Außenbewitterung deutlich mehr als die superhydrophil beschichtete Musterseite (rechts)

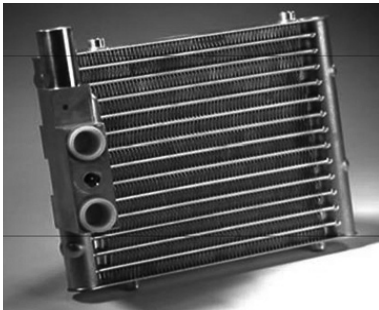


Abbildung 3-39: Wärmetauscher aus Aluminium

Anwendungen für solche Beschichtungen finden wir im Baubereich beispielsweise auf Fassaden, Dächern oder Mauerwerken. Permanent hydrophile Beschichtungen ohne Einfluss von Licht (vergleiche fotokatalytischer Effekt Kapitel 3.5.4, S. 79) finden auch Anwendungen auf Metallen; insbesondere stören schlecht verdunstende Wassertropfen bei Vorgängen in Wärmetauschern, denn die Tropfen verhindern den optimalen Wärmeübertrag zwischen Luft und Metall.

Abhilfe schaffen hier also permanente Hydrophilschichten. Wasser läuft flächig ab und die Gesamtbelastung mit Wasser wird deutlich reduziert. Ein weiterer Vorteil ist die schnelle Trocknung, dadurch dass das Wasser eine größtmögliche Oberfläche bildet, kann es auch um ein Vielfaches schneller wieder verdampfen.

Prinzipiell sind Hydrophilschichten immer dann sinnvoll, wenn der Übertrag von flüssig zu gasförmig verläuft, wie beispielsweise in Automobilkühlern, Klimaanlage, einigen Industrieanlagen oder auch bei Kühlschränken oder Kondenstrocknern.

Eine noch sehr neue Anwendung finden solche Beschichtungen auch in der Brennstoffzelle. Die Kanäle der Brennstoffzelle, durch die das Reaktivmedium strömt, werden mit einer hydrophilen Schicht versehen, damit Kapillareffekte vermieden werden, ein guter Durchfluss des Mediums und ein guter Kontakt zu den Reaktionswänden gewährleistet wird.

Neben den Oberflächeneffekten bieten insbesondere Nanopartikel die Möglichkeit, zusätzliche Effekte in Beschichtungssysteme zu integrieren. Mit der Herstellung, Verarbeitung und Anwendung von ausgesuchten Nanopartikeln befassen wir uns im nächsten Kapitel.

3.5 Herstellung und Modifizierung von Nanopartikeln

Die Herstellung und Modifizierung von Nanopartikeln bildet nach dem Schema in Abbildung 3-2 eine der wichtigsten Reaktionsprinzipien der Silan-Technologie. Man bezeichnet den Vorgang der Oberflächenmodifizierung mit Silanen auch als Silanisierung. Im Folgenden wird über die Definition von Nanopartikeln eine Übersicht über die wichtigsten Herstellungsverfahren von Nanopartikeln, der Stabilisierung und die Möglichkeit der Verarbeitung gegeben.

Von Nanopartikeln wird in einer allgemein gehaltenen Definition bei einer Partikelgröße unter 100 nm gesprochen. Die untere Grenze liegt im Bereich von 1 nm. Geht man weiter nach unten kommt man in den Größenbereich von Molekülen und Atomen. Nach einer schärferen Definition, die den Aspekt der Transparenz hervorhebt, sind Nanopartikel so klein, dass sie kein Licht mehr streuen, wenn sie in einer Matrix dispergiert vorliegen. Mit steigendem Brechungsindex müssen Partikel immer kleiner werden, um für Licht unsichtbar zu werden. Beispielsweise kann bei TiO_2 -Partikeln ($n_D = 2,6$) in einer Polymermatrix ($n_D = 1,5$) volle Transparenz erst bei Partikeldurchmessern unter 30 nm erwartet werden. Tatsächlich verschwinden letzte Streuschleier in Dispersionen sogar erst dann, wenn die Partikeln kleiner als 15 nm sind. Diese Definition ist zwar für einen Entwickler von transparenten Kratzfestbeschichtungen sinnvoll, derjenige der fotokatalytisch aktive Nanopartikel in eine weiße Wandfarbe einbaut, den stört eine leichte Trübung, die durch Nanopartikel hervorgerufen werden würde, nicht. Es zählen nur der Effekt und die feine Verteilung. Nanopartikuläre Pulver zeichnen sich durch eine große Partikeloberfläche in der Größenordnung von $100 \text{ m}^2/\text{g}$ aus. Partikel mit 4 bis 5 nm Partikelgröße erreichen bis teilweise mehr als $500 \text{ m}^2/\text{g}$ Oberfläche. Bildlich kann man sich das so vorstellen:

Legt man 1g feinen Sand in seine Handfläche, so hat dieser etwa die Oberfläche eines kleinen Tisches ($0,5 \text{ m}^2/\text{g}$). Das kann man sich gerade noch vorstellen. Legt man sich 1g eines 5 nm SiO_2 Nanopartikels auf die Handfläche, so hat man in etwa die Oberfläche eines Fußballplatzes auf der Hand. Da hört die Vorstellungskraft dann langsam auf. Das Aussehen, das Gewicht und die Zusammensetzung sind in diesem Modellfall gleich, einzig die Partikelgröße ist unterschiedlich. Diese Partikel bestehen sozusagen überwiegend aus Oberfläche. Katalytisch oder optisch wirksame Füller sind deshalb in ihrer Nanoform stets aktiver,

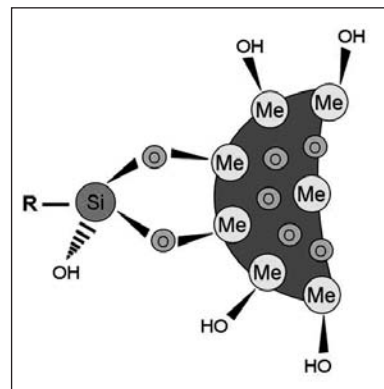


Abbildung 3-40: Schematische Darstellung der Oberflächenmodifizierung von Metalloxiden mit Silanen