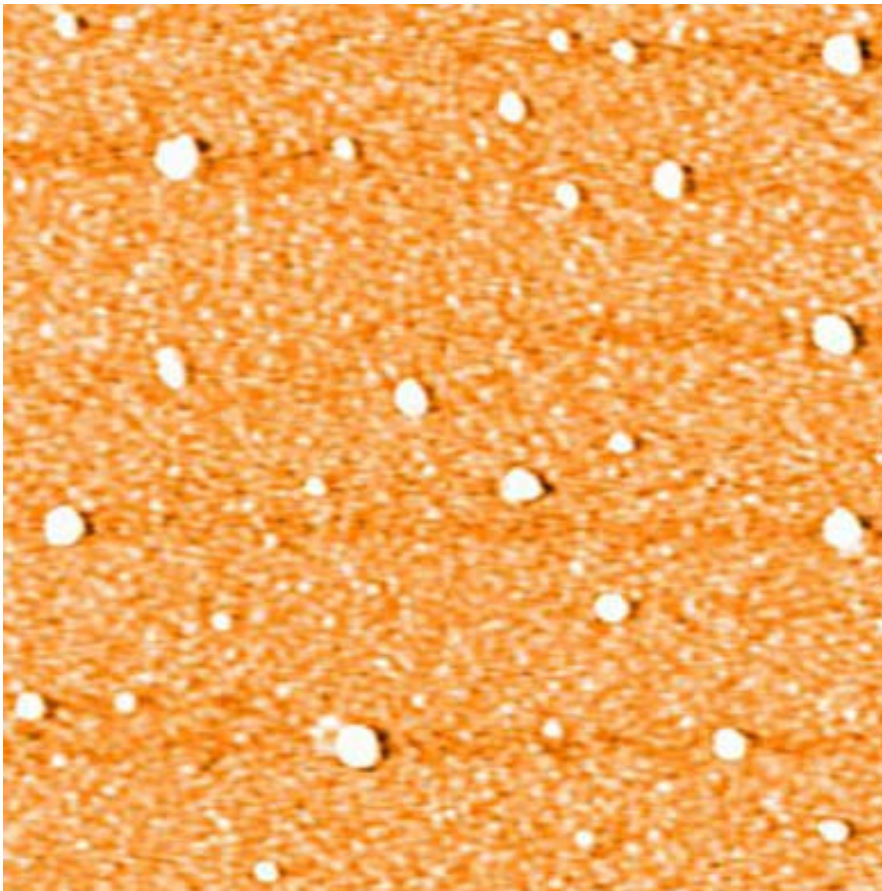


Integration von Nanopartikeln in Textilien

Abschätzungen zur Stabilität entlang des textilen Lebenszyklus



5. Januar 2009

Claudia Som, Marcel Halbeisen, Andreas Köhler

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des Projektes « NanoSafe Textiles », das vom TVS Textilverband Schweiz und der Empa finanziert wird.

Kontaktadresse:

Claudia Som (Projektleitung)
Technology and Society Lab
Empa Swiss Federal Laboratory for
Materials Testing and Research
Lerchenfeldstrasse 5
CH-9014 St. Gallen
claudia.som@empa.ch

Kommentare bitte an: claudia.som@empa.ch

Download PDF unter www.empa.ch/nanosafetextiles (keine gedruckte Fassung erhältlich)

Titelbild:

AFM (atomic force microscope) - Aufnahme von Silber-Nanopartikeln in Plasma-Polymermatrix eingebettet (Quelle: Empa, Körner et al. 2008)

1 Ausgangslage	4
2 Methodisches Vorgehen	5
3 Integration der NP in Textilien	6
3.1 Nano - Textilien mit und ohne NP	6
3.2 Herstellung der Nano - Textilien	6
3.3 Definitionen und Formen der NP.....	7
3.4 Bindungsarten zwischen NP und dem Textilmaterial.....	9
4 Integrationsmodelle	10
4.1. Faserherstellung.....	10
(A) Komposite mit metallischen oder metalloxidischen NP	11
(B) Komposite mit Ton-NP.....	13
(C) Komposite mit Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT, Carbon Nanotubes).....	15
(D) Nanometer dünne NP- Komposit - Fasern	16
(E) Fasern aus Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT).....	17
4.2 Veredelung mit NP	18
(F) Nicht kovalent gebundene NP an Faseroberfläche	18
(G) Kovalent gebundene NP an Faseroberfläche	20
(H) NP in Polymerbeschichtungen	21
(I) NP in Xero – Gel - Beschichtungen	23
4.3 Integrationsmodelle ohne NP	24
(J) Nanometer dünne Polymer-Beschichtungen ohne NP	25
(K) Nanometer dünne Xero-Gel-Beschichtungen ohne NP	25
(L) Mikrometer dünne polykristalline Keramik-Beschichtung ohne NP	26
(M) Nano- und Mikrometer dünne Metall-Beschichtungen.....	28
(N) Nanostrukturierte Mikropartikel an Faser oder in Beschichtungen	28
(O) Nanometer dünne Polymerfilamente ohne NP.....	29
(P) Self Assembled Monolayers (SAM).....	29
(Q) Nanoporöse Polymer-Fasern oder – Beschichtungen	30
(R) Mikro- und nanostrukturierte Faseroberflächen	31
5 Stabilität der Integration der NP	32
5.1 Faktoren, welche die Stabilität der Integration der NP beeinflussen	32
5.2 In welcher Form können NP freigesetzt werden?	33
5.3 Abschätzung der Stabilität der Integration der NP	33
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	37
Literatur	40
Glossar und Abkürzungen	44

1 Ausgangslage

Die Auswirkungen von synthetisch hergestellten Nanopartikeln (NP) auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt sind noch unzureichend erforscht und deshalb ungewiss. Insbesondere ist ungeklärt, bei welcher NP-Dosis negative Effekte im Organismus oder in der Umwelt ausgelöst werden (unbekannte Dosis-Wirkungsbeziehung). Auch sind die zugrunde liegenden toxikologischen Mechanismen und eventuelle Effekte von NP-Exposition über lange Zeiträume wenig erforscht.

Bei Materialien mit unbekanntem Gefährdungspotential sollte eine Exposition vermieden oder wenigstens reduziert werden. Solange das vorhandene Wissen nicht ausreicht um Risiken der NP einzuschätzen, sollte die unabsichtliche Freisetzung von NP aus Nano-Produkten und damit die mögliche Exposition von Mensch und Umwelt vermieden werden.

In verschiedenen Berichten zu Nanotechnologien wird angenommen, dass NP aus den Materialien, in die sie eingebunden sind, kaum freigesetzt werden (Royal Society 2004, BMBF 2008). Im Bericht „Responsible Production and Use of Nanomaterials“ (VCI 2008) wird angenommen, dass die meisten Produkte keine isolierte NP enthalten, sondern eher Mikrometer skalige Agglomerate und Aggregate¹ von NP. Die Annahme beruht auf der Beobachtung, dass NP dazu neigen sich zusammen zu ballen und grössere Partikel zu bilden, d.h. zu agglomerieren oder zu aggregieren. Die Auflösung solcher Agglomerate und Aggregate in einzelne NP benötigt eine Energiezufuhr durch chemische oder physikalische Prozesse. Daher wird keine nennenswerte Freisetzung von einzelnen NP aus Granulaten, Dispersionen oder Kompositen (Verbundwerkstoffe) erwartet (VCI 2008).

Bisher gibt es jedoch keine öffentlich zugängliche experimentelle Studien zur Freisetzung von NP aus Textilien, die diese Annahmen belegen. Zwar haben einige Anbieter von textilen „Nano-Ausrüstungen“ intern untersucht, ob diese „Nano-Ausrüstungen“ ihre Funktion (z.B. selbstreinigend, antimikrobiell) nach Wasch- und Scheuertests beibehalten. Nur wenige Anbieter haben dabei untersucht, ob während dieser Tests NP oder andere nanoskalige Partikel aus den Textilien freigesetzt werden². Diese Studien sind jedoch nicht veröffentlicht und ausser-

¹ Agglomerate, Aggregate,: gemäss SCENHIR (2007) ist ein Agglomerat eine Gruppe von NP, die durch schwache Kräfte wie z.B. die Van-der-Waals Kräfte zusammengehalten wird und ein Aggregate ist eine Gruppe von NP die durch starke Kräfte wie z.B. kovalente Bindungen zusammengehalten wird.

² Um die Aussagekraft von Freisetzungsversuchen einschätzen zu können, müssten – nebst der Abklärung der Anzahl und Grössenverteilung der NP - folgende Fragen beantwortet sein (mündliche Mitteilung Dr. A. Ulrich, 27. Juni 08):

1. Versuchsbedingungen:

- Probenahme: - Wartezeit bis zur Messung?
- Dauer der Messung?
- Versuchswiederholungsrate bzw. Fehlerbreite der Messungen?

Umgebung z.B. Büroluft oder Reinluft /Raumgrösse etc.?

dem fehlen standardisierte und anerkannte Methoden, mit denen die Freisetzung von NP aus Produkten zuverlässig gemessen werden kann.

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich Hinweise, dass je nach Einwirkung z.B. durch „Reinigung“, „Abnutzung“ bzw. „Materialalterung“ nanoskalige Partikel aus Produkten freigesetzt werden könnten (Schulte et al. 2008). Dies gilt möglicherweise auch für die Freisetzung von NP aus Nanoprodukten. Benn and Westerhoff (2008) haben verschiedene kommerziell erhältliche mit Silber-Nanopartikel (Ag-NP) ausgerüstete Socken experimentell untersucht. Es wurde festgestellt, dass Ag-NP in der Größenordnung von 10 bis 500 nm Durchmesser während des Waschens freigesetzt werden. Dabei variiert die Auswaschrate von Produkt zu Produkt stark. Die Autoren vermuten, dass die Art der Integration der Ag-NP und der Herstellungsprozess die Auswaschung bzw. Freisetzung von Ag-NP beeinflussen.

In diesem Bericht möchten wir - ohne Anspruch auf Vollständigkeit - aufzeigen, auf welche unterschiedlichen Arten NP in Zukunft in Textilien integriert sein könnten und welche Faktoren die Stabilität der Integration während dem Lebenszyklus beeinflussen könnten. Dies soll eine Grundlage sein, für weiterführende Diskussionen über sichere Innovationen im Bereich der Nanotextilien.

2 Methodisches Vorgehen

Um die Freisetzung von NP aus Textilien abzuschätzen, muss die Art der Integration der NP in das Textilmaterial³ bekannt sein. Das Ziel dieser Arbeit ist es zu verstehen:

- wie die NP in den Textilien integriert sein könnten
- wie die Art der Integration und die Art der NP mit einer möglichen Freisetzung von NP zusammenhängen
- durch welche Einwirkungen im Lebenszyklus eines Textils es möglicherweise zur Freisetzung von NP kommen kann.

In Produktwerbungen im Internet und in Berichten in internationalen Fachzeitschriften werden vor allem die funktionellen Eigenschaften der Nanotextilien beschrieben. Die Art der Integration der NP in Textilien ist oft nur spärlich beschrieben. Daher stützen sich die folgenden Kapitel vor allem auf Forschungsstudien, die auch Informationen über die Integration der NP im

Messverfahren (z.B. SMPS)?

2. Info zum geprüften Stoff:

Nano-Stoff, welche und wie viele synthetische NP sind darin enthalten?

Vorbehandlung der Stoffe (z.B. gewaschener oder neuer Stoff)?

Referenzprobe?

3. Analyse der Partikel

Chemische Zusammensetzung und Morphologie der Partikel?

³ Der Begriff „Textilmaterial“ umfasst Fasermaterial und Beschichtungsmaterial

Textilmaterial enthalten. Zusätzlich wurden Experten von anwendungsorientierten Forschungsinstituten und aus der Industrie interviewt.

3 Integration der NP in Textilien

3.1 Nano - Textilien mit und ohne NP

Nano - Textilien erfüllen Funktionen (antibakteriell, selbstreinigend, leitend, antistatisch, Schutz gegen ultraviolette Strahlung (UV), Flammschutz, thermisch isolierend und vieles mehr), die auf den Effekten von nanoskaligen Strukturen beruhen. Diese nanoskaligen Strukturen können NP sein, wie in 3.3 beschrieben oder auch nanoskalige Strukturen ohne NP (PAS 2007), z.B. Polymere, die nanoskalige Poren enthalten (weitere Beispiele in 4.3). Dieser Bericht fokussiert auf Nano - Textilien, die NP enthalten (s. Kap. 4.1, 4.2), da die möglichen Risiken der NP zur Diskussion stehen. (Tab. 1)

3.2 Herstellung der Nano - Textilien

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten der Einbringung von NP in Textilien unterscheiden (vergl. Brückmann et al. 2006) (Tab 1):

- **Faserherstellung (s. Kap. 4.1):** Die NP werden durch „Compoundierung“ ins Polymer eingebracht. Die so hergestellten NP-Komposite werden z.B. mittels Schmelzspinnen oder Lösungsspinnen zu Fasern oder mittels Elektrosponnen zu Nanometer dünnen Fasern weiterverarbeitet. Damit sich die NP gleichmässig im Faservolumen verteilen lassen, werden sie in der Regel funktionalisiert, in dem man die NP beschichtet oder chemische Gruppen anhängt. Die Funktionalisierung soll die Neigung der NP zur Agglomeration verhindern.
- **Veredelung (s. Kap. 4.2):** Fasern (Chemie- und Naturfasern) können mit NP veredelt werden:
 - durch Anlagerung der NP an Faseroberflächen
 - durch das Aufbringen von Beschichtungen, die NP enthalten.

Damit einzelne NP oder Beschichtungen, welche NP enthalten, stärker an die Faseroberfläche gebunden werden können, werden die NP oft funktionalisiert und die Faseroberflächen vorbehandelt

Nano -Textilien		
NP während der Faserherstellung in Faservolumen integriert (s. Kap. 4.1)	NP während der Veredelung auf Faser aufgebracht (s. Kap. 4.2)	Keine NP im Textil, dafür NP-freie Nanostrukturen, (s. Kap.4.3)

Tabelle 1: Nano - Textilien können NP enthalten oder NP - freie Nanostrukturen, wie z.B. nanoskalige Poren oder Beschichtungen

Die NP können bei der Herstellung der Textilien entweder:

- als freies Pulver oder als Dispersion/Suspension in Polymere eingemischt werden (z.B. zu Masterbatches in Granulatform)
- oder als Dispersionen/Suspension/Sol-Gel in den Herstellungsprozess gelangen (z.B. Sol-Gel-, Tauch-, Spray-Prozesse)
- oder „in situ“, d.h. während des Prozesses generiert werden (z.B. Plasmabeschichtung)
- oder nur bei der Herstellung als Ausgangsstoffe, aber nicht mehr im textilen Endprodukt vorhanden sein (z.B. in manchen Sol-Gel-Prozessen).

Um eine mögliche Exposition am Arbeitsplatz durch freigesetzte NP zu reduzieren, wird empfohlen, die NP in nasschemischer Form (Suspension oder Dispersion) zu verarbeiten oder „in situ“ in geschlossenen Systemen zu generieren (Schulte et al. 2008).

3.3 Definitionen und Formen der NP

Bisher gibt es keine international gültige Definition zu den Begriffen „synthetische Nanopartikel (NP)“ und „Nanomaterialien“. Gemäss dem Entwurf der International Standard Organisation (ISO 2007) und von SCENHIR (2007) steht der Begriff „synthetische Nanopartikel“ nur für NP, die drei äussere Dimensionen im nanoskaligen Bereich haben, also „kugelförmige“ NP wie zum Beispiel metallische (z.B. Ag, Au) oder metalloxidische NP (z.B. TiO₂). Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT), welche zwei äussere Dimensionen im nanoskaligen Bereich haben, werden „Nanotubes“ genannt und Ton-NP (z.B. Schicht-Silikate), welche eine äussere Dimension im nanoskaligen Bereich haben, werden als „Nanoplates“ bezeichnet. Als Überbegriff wird von der ISO (2007) „Nano-Objekt“ vorgeschlagen. Da in Publikationen weiterhin der Begriff „synthetische Nanopartikel (NP)“ als Überbegriff verwendet wird, umfasst der Ausdruck „synthetische Nanopartikel (NP)“ in diesem Bericht nicht nur die kugelförmigen NP, sondern auch die plättchenförmigen und faserförmigen NP.

Die Bezeichnungen für NP wie z.B. „Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT)“ (Abb. 1) „TiO₂“, und weitere stehen nicht für einheitliche NP sondern für eine Gruppe von NP. Die NP unterscheiden sich innerhalb der Gruppe voneinander z.B. durch Grösse, Durchmesser, Länge, Kristallstruktur

tur, Verunreinigungen, Funktionalisierung, Dichte und weitere Parameter. Je nach Herstellungsprozess erhält man mehr oder weniger einheitliche NP. Der Herstellungsprozess beeinflusst auch den Prozentsatz an Verunreinigung der NP mit anderen Substanzen. Dies beeinflusst die möglichen Auswirkungen der NP auf die Gesundheit und die Umwelt, aber auch auf die Qualität eines Produktes..

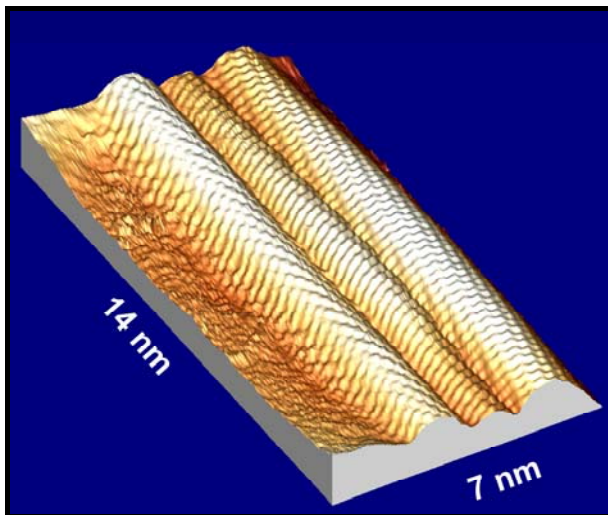


Abbildung 1: 3D Darstellung einer Rastertunnel Mikroskopie-Messung dreier einwandiger CNT mit atomarer Auflösung (Durchmesser 1 nm) Quelle Empa. Der Begriff „Kohlenstoffnanoröhrchen“ umfasst eine grosse Gruppe von NP, die sich bezüglich Durchmesser, Länge, Ein- bzw. Mehrwandigkeit, offene bzw. geschlossene Enden und mehr unterscheiden.

Der Begriff „Nanomaterial“ steht als Überbegriff für NP und für nanostrukturiertes Material (BSI 2007, SCENHIR 2007, VCI 2008) (Abb. 2). Nanostrukturiertes Material kann NP enthalten oder NP-frei sein, z.B. nanoporöse Polymerfasern oder nanoskalige Beschichtungen. Aus dieser Sicht sind auch Mikrometer skalige Partikel, welche aus aggregierten oder agglomerierten NP zusammengesetzt sind, Nanomaterialien.

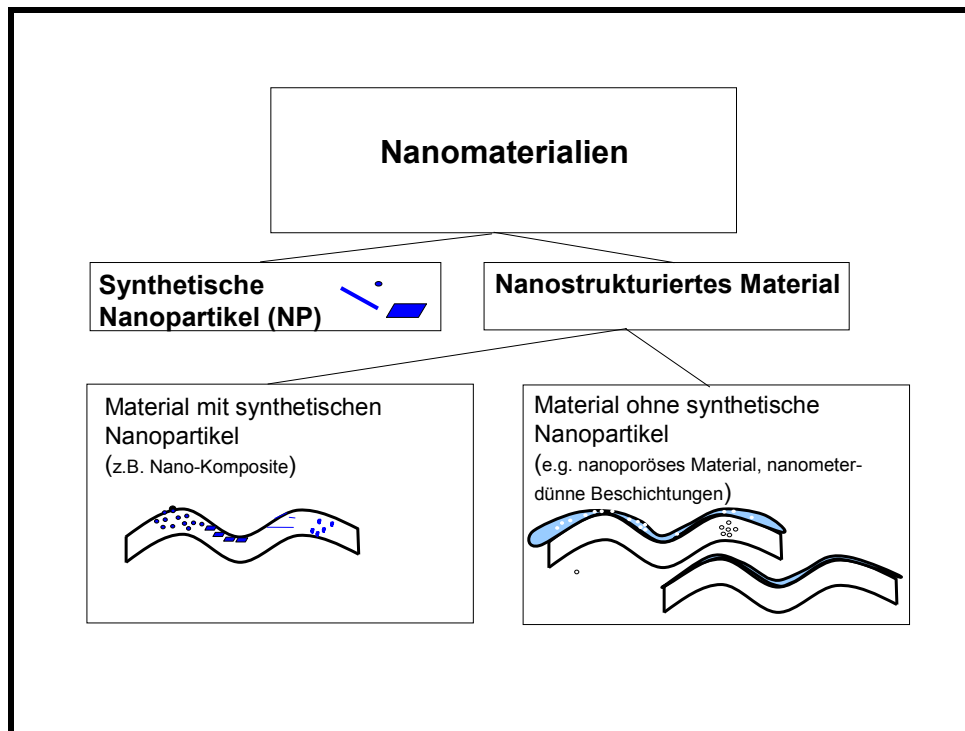


Abbildung 2: Definitionen und Formen von NP und Nanomaterialien

3.4 Bindungsarten zwischen NP und dem Textilmaterial

Die NP können unterschiedlich an Textilmaterial gebunden sein durch (in der Stärke abnehmend):

- kovalente Bindung
- ionische Bindung
- Wasserstoffbrücken - Bindung
- Van-der-Waals-Bindung (relativ stabil gegenüber Reibung)

Da die Auswirkungen der NP auf Gesundheit und Umwelt nicht bekannt sind, sollten die NP so an das Textilmaterial gebunden sein, dass sie nicht unbeabsichtigt freigesetzt werden. Es werden aber auch textile Anwendungen erforscht, bei denen NP bzw. Nano - Kapseln oder Mikro - Kapseln absichtlich freigesetzt werden sollen (z.B. Chitosan – Mikro-Kapseln, www.hohenstein.de). In der Literatur sind jedoch nur spärliche Angaben zu finden, aus welchen Substanzen diese Nano-Kapseln (bzw, Container, Depotstrukturen) bestehen und wie sie funktionieren.

4 Integrationsmodelle

Die im Folgenden erläuterten Integrationsmodelle umfassen vor allem die in Forschungsstudien beschriebenen Arten der Integration von NP. Welche Modelle schon auf dem Markt sind oder wahrscheinlich in Zukunft auf den Markt kommen werden, ist schwierig zu eruieren. Denn zum Teil werden Produkte aus Marketing-Gründen mit „Nano“ beworben, obwohl sie keine Nanomaterialien enthalten und zum Teil werden sie nicht mit „Nano“ bezeichnet, obwohl sie Nanomaterialien enthalten (Dekkers et. al 2007). Der Vielfalt der Möglichkeiten sind auch keine Grenzen gesetzt, d.h. es ist nicht auszuschliessen, dass in Zukunft weitere Integrationsmodelle erforscht werden.

Das Wissen über die Integrationsmodelle ist unterschiedlich stark entwickelt. Das hat dazu geführt, dass einige Integrationsmodelle ziemlich detailliert erläutert werden können und andere relativ kurz abgehandelt werden. Zusätzlich zu den Modellen, welche die Integration der NP in Textilien beschreiben, finden sich im Kapitel 4.3 weitere Modelle, bei denen ohne NP auf „Nano“ basierende Effekte genutzt werden können (Nano - Textilien ohne NP).

4.1. Faserherstellung

Liegen NP in Polymeren vor, werden diese als „NP – Komposit“ oder als „Nano-Komposit“ bezeichnet. Üblicherweise liegt der Anteil der NP in solchen Kompositen bei 0.1 - 5 Gewichtsprozent (Gew %, engl. wt %) und ist damit im Vergleich zu herkömmlichen mineralischen Füllstoffen sehr gering (McNally 2004). In der wissenschaftlichen Literatur sind oft auch höhere Gewichtsprozent zu finden. Es wird jedoch vermutet, dass für das Erreichen von verschiedenen Funktionen „weniger ist mehr“ gilt und der Anteil der NP in Kompositen für Textilien unter 1 Gew %, wenn nicht gar unter 0.1 Gew % liegt (Som et al. 2007). Da die Fasern aus NP - Komposit mit weiteren Fasern im Textil gemischt sind, liegt der Gewichtsanteil der NP im textilen Endprodukt wahrscheinlich oft deutlich unter 0.1 Gew %. Die Herausforderung besteht darin, die NP in den Masterbatch und später in den Fasern regelmässig zu verteilen. Dies wird durch gezielte Funktionalisierung der NP versucht.

Im Textilbereich werden neben vielen anderen vor allem folgende Gruppen von NP in Polymere eingemischt und in NP - Kompositform zu Fasern verarbeitet (oft noch im Forschungsstadium):

- Metallische NP (z.B. Ag, Au) → Integrationsmodell (A)
- Metalloxidische NP (z.B. TiO₂, Al₂O₃, ZnO, MgO) → Integrationsmodell (A)
- Nano-Schichtsilikat, bzw. Ton-NP (engl. Nanoclay) → Integrationsmodell (B)
- Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) → Integrationsmodell (C)

Es ist theoretisch auch möglich, verschiedene NP in ein Komposit einzubringen, um ein multifunktionelles Komposit zu erhalten. Neben den oben erwähnten Gruppen von NP werden auch „Komposit – NP“ erforscht, d.h. nanoskalige Partikel, die sich aus verschiedenen NP zusammensetzen.

Für Textilanwendungen werden die NP - Komposite zu Fasern gesponnen. Das Spinnen erfolgt in der Regel durch die in der Textilindustrie üblichen Technologien wie z.B. Schmelzspinnen. Dabei können auch sogenannte Bikomponenten-Fasern aus unterschiedlichen thermoplastischen Polymeren gesponnen werden. Die zwei Polymere können dabei Seite an Seite liegen oder in einer sogenannten Kern/Mantel-Struktur konzentrisch angeordnet sein. Am häufigsten verwendet werden die vier thermoplastischen Polymere Polyester (z.B. Polyethylenterephthalat (PET), Polyamid (PA) (z.B. Polyamid 6), Polyacryl (PAN), Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) (Lübben 2005, CIRFS 2008). PE und PP werden meist für Spezial-Anwendungen (z.B. Geotextilien, Teppiche) eingesetzt. Die Querschnitte der Fasern (Chemiefasern) sind nicht nur rund, sondern können auch mehrlappig, dreieckig, sternchenförmig bis zu bändchenförmig sein (s. Abb. 3).

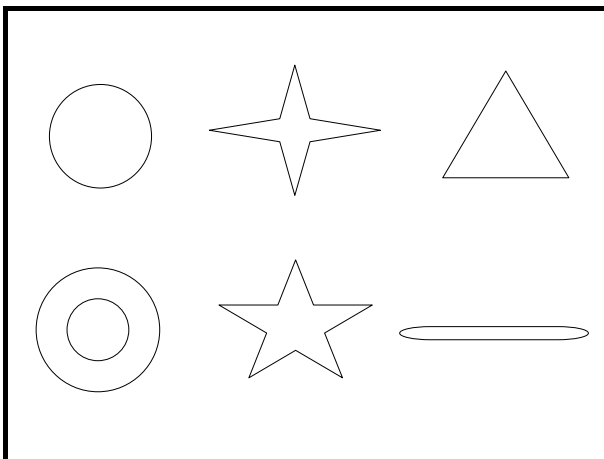


Abbildung 3: Unterschiedliche Querschnitte von Polymer-Fasern

Die NP-Komposite können auch als Nanofasern (nanoskaliger Durchmesser) weiterverarbeitet werden → Integrationsmodell (D).

Neben den NP-Kompositen können auch Fasern aus nur Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) hergestellt werden → Integrationsmodell (E)

(A) Komposite mit metallischen oder metalloxidischen NP

Die Herstellung von NP-Kompositen mit metallischen (z.B. Ag, Au) und metalloxidischen NP (z.B. TiO_2 , SiO_4 , Al_2O_3 , CaCO_3 , ZnO , MgO) erfolgt zumeist mittels Schnecken-Extruder (engl. twin extruder). Im Fall von Silber (Ag) wird nanoskaliges Silberpulver (von kommerziellen Lieferanten) und eine Polymerschmelze im Extruder gemischt und zu einem Masterbatch in Pelletform verarbeitet. Bei Yeo et al. (2003) wurde Silberpulver mit runden NP und Korngröße

von 16 nm verwendet. Die erzeugten NP - Komposite hatten Silbergehalte zwischen 3 und 10 Gew%, wobei ein Teil des Silbers in Form aggregierter Ag-NP im Masterbatch vorlag. Beim Verspinnen wird das Masterbatch in Extrudern mit Polymer (hier: Polypropylen (PP)) weiter verdünnt und anschliessend durch einen Schmelzspinnprozess zu Fasern verarbeitet. Dabei kommen die üblichen Schmelzspinntechnologien zum Einsatz. Es ist auch möglich, Mehrkomponentenfasern herzustellen. Yeo et al. (2003) erzeugten Kern-Mantel Fasern mit jeweils unterschiedlichem Ag-NP-Anteil. Für einen antibakteriellen Effekt müssen Ag-Ionen aus den Ag-NP an die Faseroberfläche gelangen können. Die Ag-NP-Komposite müssen an der Faseroberfläche liegen, also z.B. in der Mantelfaser. Über die Art der Einbindung der NP in die Polymermatrix sind keine Angaben in der überprüften (reviewed) Literatur zu finden (Jeong et al 2005). Die NP können entweder vollständig vom Polymer umhüllt sein oder teilweise frei an der Polymeroberfläche vorliegen (Abb. 4). Zudem können die NP durch verschiedene Bindungsarten (s. 3.4) im Polymer fixiert sein. Chemische (kovalente) Bindungen zwischen Polymer und Metall wären nur nach chemischer Vorbehandlung der Ag-NP (z.B. Ausbildung von Oxid-Hydratschichten) zu erwarten. In diesem Fall wäre gemäss theoretischen Vorstellungen die Ausbildung einer metall-organischen Grenzschicht (Interphase) an der NP-Oberfläche möglich, in der kovalente Bindungen vorherrschen (Nikolowa 2005). Es gibt jedoch mehrere Modelle über diese Grenzflächen, die sich im Erklärungsansatz unterscheiden.

Kleine Metall- und Metalloxid-NP (< 5 nm) tendieren im Polymer mit der Zeit dazu mit ihresgleichen zu agglomerieren oder an die Oberfläche des Polymers zu drängen. Schon früher wurde beobachtet, dass Mikrometer skalige Farbpigmente durch Hitzeeinwirkung an die Oberfläche des Polymers diffundieren können. Werden die NP gezielt funktionalisiert (durch Aenderung der chemischen Zusammensetzung und/oder Struktur der NP-Oberfläche) können die NP während der „Compoundierung“ besser vom Polymer „benetzt“ und daran gehindert werden, im Polymer zu agglomerieren oder an die Oberfläche des Polymers zu drängen.

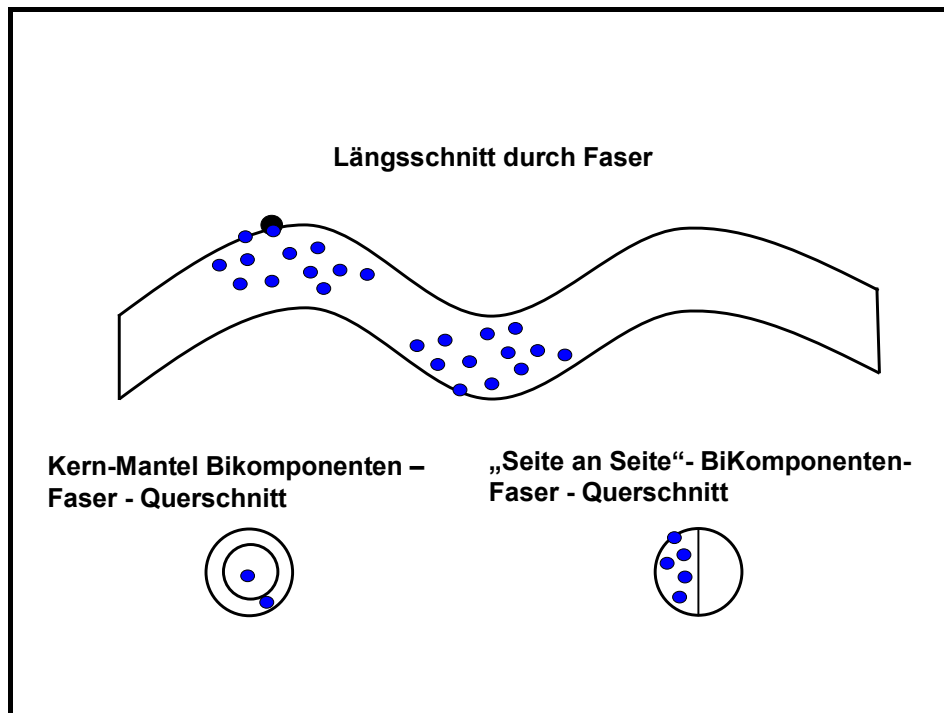


Abbildung 4: Komposit-Faser mit metallischen oder metalloxidischen NP. NP entweder form-schlüssig von Polymer vollständig umgeben oder teilweise an Polymeroberfläche freiliegend. *Aus graphischen Gründen stimmt das Grössenverhältnis NP (blau) zu Faser (weiss) nicht, denn die NP wären zu klein, um sichtbar zu sein (dies gilt auch für alle folgenden Abbildungen).*

(B) Komposite mit Ton-NP

Von Interesse für textile Anwendungen sind die Schichtsilikate, insbesondere Montmorilloniten ($\text{Al}_2[(\text{OH})_2/\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$) wegen ihrer grossen Oberfläche, aber auch Hektorite und Saponite. Die Nanotone sollen verbesserte Eigenschaften haben bezüglich z.B. der UV- und Hitze-Resistenz, herabgesetzte Entflammbarkeit und Gasdurchlässigkeit und erhöhte Bioabbaubarkeit von bioabbaubaren Polymeren. Die Schichtdicke der Ton - NP liegt etwa bei 1 nm und die seitliche Dimension der Schicht variiert von 30 nm bis hin zu mehreren Mikrometern (Patanaik et al. 2007). Die Nanotone besteht aus hydratisierten Aluminosilikaten (hydrous aluminosilicate) von geringer Dichte (Qian 2004).

Abhängig von den Verarbeitungsbedingungen bei der Faserherstellung sind die Ton-NP (engl. Nanoclay) verschieden stark mit dem Polymer verbunden. Ton-NP, die dem Polymer ohne weitergehende in-situ Reaktion beigemischt werden, behalten ihre ursprüngliche kornförmige Gestalt und sind durch ihre enorm grosse Oberfläche fest in das Polymer eingebettet. Ziel der Forschung ist es allerdings, die Ton-NP noch weiter bis auf die einzelnen Silikatschichten zu zerlegen. Dies geschieht meist während der Masterbatch-Herstellung durch chemische in-situ Reaktionen in der Polymerschmelze. Dabei werden die Grenzflächen zwi-

schen den einzelnen Silikatschichten der Tonpartikel durch Polymermoleküle durchdrungen (engl. „Intercalation“) wodurch die Tonpartikel aufquellen. Das Komposit enthält nun parallel ausgerichtete, aber voneinander gelöste Silikatschichten von etwa 1 nm Schichtdicke und 200 - 1000 nm Durchmesser. Noch weitergehende Dispersion der Silikatschichten erzeugt einen Zustand, in dem die Silikatschichten völlig aufgeblättert (engl. „exfoliated“) im Polymer vorliegen. In diesem Zustand ist eine optimale Dispersion der NP in Polymer erreicht, bei der ein grösstmöglicher Oberflächenkontakt zwischen NP und Polymer entsteht. Durch Extrudieren und Verspinnen lassen sich die regellos angeordneten Silikatschichten der aufgeblätterten Ton-NP wieder in nahezu parallele Anordnung bringen (Abb. 5). Dadurch wird eine Verbesserung bestimmter Eigenschaften (Festigkeit, Diffusionsbarriere, Flammhemmung) ermöglicht (Bourbigot et al. 2002, Bourbigot et al. 2004, Patanaik et al. 2007).

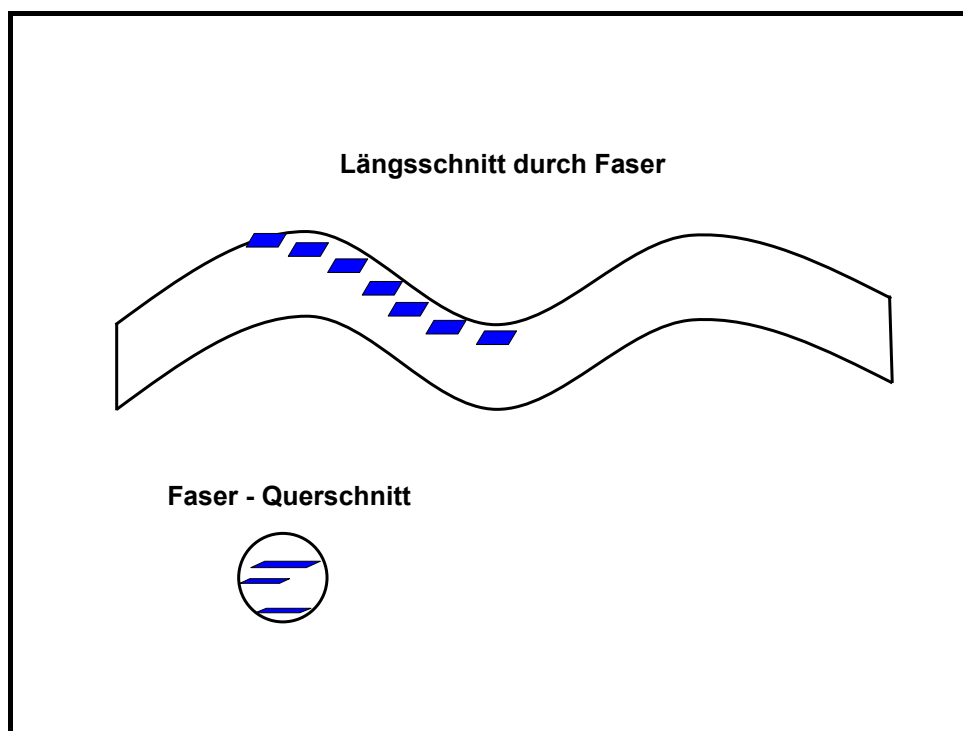


Abbildung 5: Komposit-Faser mit Ton-NP. NP entweder formschlüssig von Polymer vollständig umgeben oder teilweise an Polymeroberfläche freiliegend. Die NP scheinen durch ihre grosse Oberfläche gut mit dem Polymer verbunden zu sein.

Ton-NP werden aber auch als Träger von Wirkstoffen erforscht (Persico et al. 2006). Ausserdem lässt sich die Färbbarkeit von Polypropylen (PP) - Fasern verbessern, indem an den Oberflächen der Ton-NP ausreichend viele Bindungsstellen für den Farbstoff in die Faser eingebracht werden (Qian 2004). Der Gehalt an Ton-NP in Kompositen (engl. Polymer Layered-Silicate Nanocomposites, PLSN) liegt bei weniger als 5 Gewichtsprozent (McNally 2004).

(C) Komposite mit Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT, Carbon Nanotubes)

Durch Dispersion von Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) in Polymeren sollen Komposite entstehen, die sich durch ihre höhere mechanische Stärke sowie durch thermische und elektrische Leitfähigkeit auszeichnen (Abb. 6) (Erickson 2003). Die Herstellung solcher Komposite ist nicht trivial, weil die Dispergierung der CNT im Polymer schwierig ist. Die CNT neigen dazu, grössere Aggregate zu bilden, die sich in der Polymerschmelze wie grössere Partikel verhalten. Diese Neigung der CNT behindert eine homogene Verteilung der einzelnen CNT. Die Ursache liegt in der π - π - Wechselwirkung zwischen den gekrümmten Oberflächen der CNT⁴ (Krüger 2004). Diese intermolekularen Kräfte üben eine starke Anziehung zwischen den einzelnen CNT aus, wodurch sich diese zusammenballen. Für eine ausreichende Dispergierung der CNT im Komposit müssen diese Anziehungskräfte aufgebrochen werden, wozu eine Energiezufuhr notwendig ist. Dies ist mechanisch (u.a. durch Ultraschall) oder durch Anlagerung von Tensiden an CNT möglich. Allerdings sind diese Verfahren aufwändig und für technische Anwendungen im Textilbereich schlecht geeignet. Als Alternative bietet sich die chemische Funktionalisierung der CNT an. Darunter ist eine kovalente Bindung von funktionellen Molekülgruppen auf der äusseren Oberfläche der hohlen CNT (exohedral) zu verstehen. Als Funktionalisierung kommen u.a. Carboxylgruppen, Hydroxylgruppen, Amino- und Phenylgruppen in Frage.

Die funktionellen Molekülgruppen verhindern zum einen die gegenseitige Anziehung der CNT und begünstigen dadurch eine Dispergierung in einzelne NP. Ausserdem wird die Löslichkeit der CNT in verschiedenen Lösungsmitteln (darunter Wasser) verbessert. Zum anderen bieten die funktionellen Molekülgruppen ihrerseits chemische Andockstellen für kovalente Bindungen zu Polymermolekülen. Die Funktionalisierung der CNT- Seitenwände gelingt deutlich schlechter als an den offenen Spitzen. Zudem ist die Seitenwand-Funktionalisierung bei mehrwandigen CNT (engl. multiwalled carbon nanotubes, MWCNT) aufgrund der geringeren Krümmung der Wände (grössere Durchmesser als einwandige CNT (engl. single walled CNT, SWCNT)) schlechter möglich.

Es wird vermutet, dass die CNT ein Potential haben für verbesserte Zugfestigkeit, elektrische Leitfähigkeit, mechanische wie thermische Eigenschaften (Gottschalk 2006, Siegfried 2007). Beyer (2002) erforscht die CNT für flammhemmende Textilien. Das Extrudieren und Verspinnen dieser NP - Komposite zu Fasern sowie deren Verarbeitung zu Textilien ist eine technische Herausforderung und Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten weltweit.

⁴ Durch die Krümmung der Graphengitterebene in der CNT-Wand tritt eine Pyramidalisierung der Kohlenstoff-Atome auf. Als Konsequenz werden die normalerweise symmetrisch verteilten π -Orbitale auf die Aussenseite der CNT Wand "gedrückt" und erzeugen eine höhere Oberflächenanziehung.

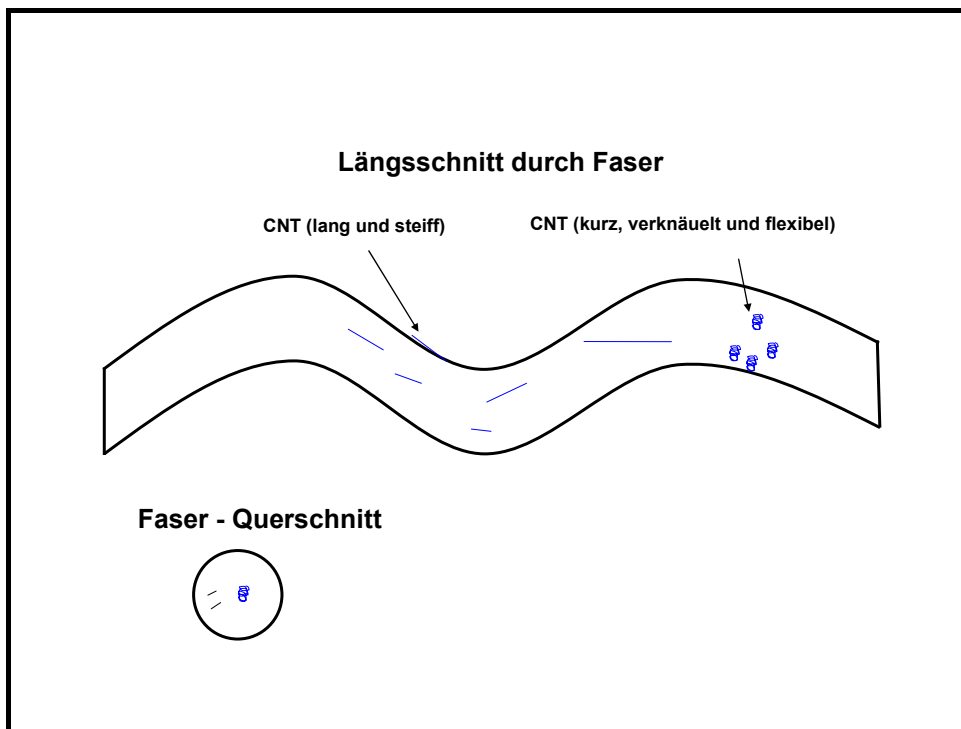


Abbildung 6: Komposit-Faser mit CNT. Um die Fasern leitfähig, zugfest oder gegenüber Hitze beständiger zu gestalten, müssen die CNT nadelförmig und ausgerichtet sein, damit die Perkolationschwelle erreicht wird (d.h. die CNT sich durchgehend berühren).

(D) Nanometer dünne NP- Komposit - Fasern

In verschiedenen Forschungsarbeiten ist die Herstellung (Elektrospinning) von Nanofasern (nanoskaliger Durchmesser) aus verschiedenen Materialien beschrieben, die z.T. NP enthalten (Musil et al. 2007, Li et al. 2008, Bazbouz and Stylios 2008, Dai et al. 2008, Nakayama et al. 2008, Park et al. 2008). Diese Nanofasern werden fast ausschliesslich als Vlies abgedruckt, da es anspruchsvoll ist, diese Fasern als Garn aufzuspulen (Abb. 7). Mehr als 50 verschiedene Polymere können mit Elektrospinning zu Nanometer - und Mikrometer skaligen Fasern gesponnen werden, mit Querschnitten von < 3 nm bis über $1 \mu\text{m}$ (Huang et al. 2003, Huang et al. 2006). Fasern mit einem Durchmesser im Nanometer - Bereich haben ein grosses Oberflächen/Volumen- Verhältnis. Sie scheinen eine erhöhte Zugfestigkeit und eine verminderte Gasdurchlässigkeit, wie auch eine verminderte Entflammbarkeit aufzuweisen als dickere Fasern (Patanaik et al. 2007). Stoffe aus Nanofasern haben eine kleine Porengrösse und eine grosse Oberfläche und würden sich für sehr unterschiedliche Anwendungen eignen wie Filter, künstliches Leder, Windeln und vieles mehr. Die „Nanofasern“ lassen sich auch als Kern/Mantel-Struktur oder als Seite-an-Seite- Bikomponenten Struktur spinnen. Bisher werden die Nanofasern noch nicht im grossem Massstab von der Textilindustrie genutzt (Zhou and Gong 2008).

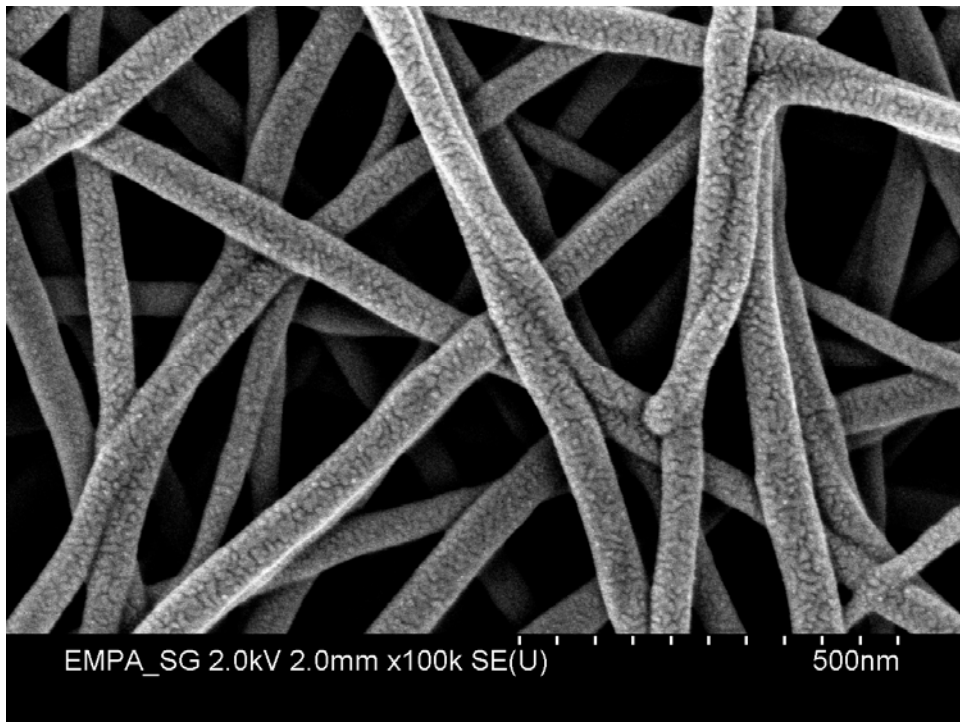


Abbildung 7: Vlies aus Nanometer dünnen Fasern (Elektrospinning), die NP enthalten können (REM-Bild EMPA).

(E) Fasern aus Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT)

Verschiedene Forschungsgruppen und Firmen arbeiten an der Entwicklung von Fasern aus CNT (z.B. http://www.lanl.gov/news/index.php/fuseaction/home.story/story_id/8900, abgerufen am 7. Juni 08, Li et al. 2004,). Die Firmen Kuraray und Mitsui haben angekündigt, Produkte wie Krankenhausbekleidung aus textilen Fasern aus Kohlenstoffnanoröhrchen, die antistatisch wirken, schon 2008 zu produzieren (Japan Markt, Nanotech 2008). (Abb. 8)

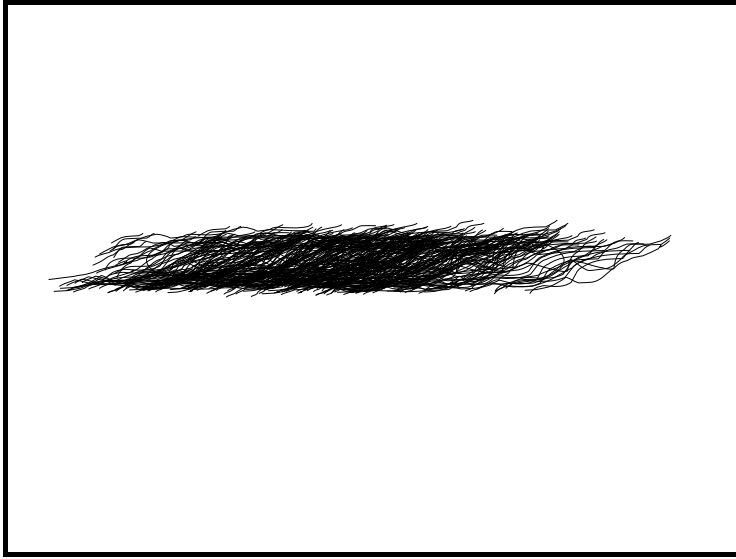


Abbildung 8: Faser aus CNT

4.2 Veredelung mit NP

Während der Veredelung können nicht nur Chemiefasern mit NP ausgerüstet werden, sondern auch natürliche Fasern, wie Baumwolle, Wolle und Seide und andere. Dabei können einzelne Fasern oder Garne oder textile Flächen wie Gewirke, Gewebe oder Vliese veredelt werden.

Die NP können entweder einzeln oder als Agglomerate oder Aggregate auf die Faseroberfläche aufgebracht werden:

- NP nicht kovalent an Faseroberfläche gebunden → Integrationsmodell (F)
- NP kovalent an Faseroberfläche gebunden → Integrationsmodell (G)

Die NP können aber auch in eine Beschichtung integriert auf die Faseroberfläche aufgebracht werden:

- NP in Polymer-Beschichtung → Integrationsmodell (H)
- NP in Xero-Gel-Beschichtung → Integrationsmodell (I)

(F) Nicht kovalent gebundene NP an Faseroberfläche

NP, die durch Tauchen, Padding, Bedrucken oder andere Verfahren auf künstliche (Chemiefasern) oder natürliche Fasern aufgetragen werden, ohne dass weitere Bindemittel verwendet werden, haften oft aufgrund von nicht kovalenten Kräften auf der Faseroberfläche (Abb. 9). Vor allem Silber-NP (Ag-NP) werden auf diese Art auf Textilien aufgetragen (Yuranova et al. 2006, Lee et al. 2003); im Prinzip ist dies bei allen Arten von NP möglich. So hat z.B. Liu et al.

(2007) Baumwolle an der Faseroberfläche mit einem Netzwerk von CNT-„Cluster“ (agglomerierte oder aggregierte NP) beschichtet, um künstliche Lotus Strukturen zu schaffen.

Die Chemiefasern bestehen aus dreidimensional vernetzte Makromolekülen (Polymere), die sich aus der Verkettung (Polymerisation) gleichartiger kürzerer Molekülbestandteile (Monomere) bilden. Dabei werden die einzelnen Monomere durch kovalente Bindungen miteinander verkettet. Die Makromoleküle der Polymere sind unpolar, das heisst die Elektronenverteilung im Molekül ist isotrop, es treten keine permanenten Dipolmomente auf.

Die NP haften durch Van-der-Waals Bindungen auf der unpolaren Faseroberfläche. Obwohl die Van-der-Waals Bindung im Vergleich zur kovalenten (chemischen) Bindung und zur Ionenbindung schwach sind, können die NP dauerhaft an der Faseroberfläche fixiert sein. Der zugrundeliegende Mechanismus ist die gegenseitige Anziehung von Oberflächen unpolarer Substanzen durch Nebenvalenzbindungen (Nikolova 2005). Kurzzeitige Fluktuationen der Ladungsverteilung im Molekül (oder NP) bewirken die temporäre Ausbildung eines Dipols, welches andere temporäre Dipole im Nahbereich anzieht. Durch gegenseitige Influenz werden zudem auch unpolare Moleküle in unmittelbarer Umgebung solcher temporärer Dipole ebenfalls zu Dipolen, wodurch sich die gegenseitige Anziehung verstärkt. Die Van-der-Waals Kraft wirkt nur auf sehr kurze Distanz (Nanometerbereich), kleinste Partikel werden deshalb stärker angezogen als grosse. Durch das bei NP besonders grosse Verhältnis von Oberfläche zu Masse ist auch der den Van-der-Waals Kraft unterliegende Anteil der NP-Oberfläche gross. Neben der Erklärung der Bindung mit Van-der-Waals Kräften existieren eine Reihe weiterer Modelle über Wechselwirkungen von Oberflächen im Nanometerbereich (Nikolowa 2005).

Da die NP nicht durch chemische Verbindung oder Einbettung in eine Beschichtung auf dem Textil fixiert sind, können äussere Einwirkungen theoretisch zu einer Ablösung der NP von der Faseroberfläche führen. Dazu ist eine Energiezufuhr erforderlich. Mögliche Einwirkungen sind Reibung, Turbulenz von Flüssigkeiten (beim Waschen), chemische Agenzien (z.B. Tenside), evtl. auch Mikroorganismen.

Es ist nicht auszuschliessen, dass sich durch Reibung die Ladungszustände an Materialoberflächen ändern und sich NP, die nicht kovalent am Textil gebunden sind, von dort ablösen und an das andere Material, das die Reibung verursacht, „anheften“.

In Experimenten wurde je nach Herstellungsprozess und Textilmaterial eine durchaus hohe Waschpermanenz (Waschbeständigkeit) der Nano -Textilien beobachtet. Allerdings wurde bei diesen Versuchen meist auf die Waschpermanenz der erwünschten Funktion (z.B. antibakterielle Wirkung) geachtet und nicht direkt die Menge der freigesetzten nanoskaligen Partikel oder die chemische Zusammensetzung und Morphologie dieser Partikel bestimmt. Lee et al. (2003) berichten über die Messung der Waschpermanenz von Kolloid-Ag beschichteten Baumwoll - Textilien. Demnach sinkt die Konzentration der Ag-Np von anfänglich 26 ppm vor der ersten Wäsche auf 2,7 ppm nach 10 Waschgängen und bleibt nach weiteren 10 Wäschen annähernd konstant bei 2 ppm. Die Autoren vermuten eine starke Bindung der nach 10 Wä-

schen noch auf dem Textil verbleibenden NP an die Faseroberflächen, ohne aber weiter zu spezifizieren, ob die NP kovalent oder nicht kovalent an die Faser gebunden waren.

Theoretisch werden NP bei einer hohen relativen Luftfeuchtigkeit von 100% ($RH = 100\%$) weder von Van-der-Waals - noch von Kapillarkräften stark an der textilen Faser gehalten. Dies hängt damit zusammen, dass die Dielektrische Konstante von Wasser ca. 80 ($\epsilon_{\text{Luft}} \approx 80$) und die von Luft etwa 1 ($\epsilon_{\text{Luft}} \approx 1$) ist und die Van-der-Waals Kraft sich umgekehrt proportional zur dielektrischen Konstante verhält. Oder anders formuliert: Wasser ist ein Dipol und kann daher die Van-der-Waals Kräfte herabsetzen.

Dieser Effekt ist nützlich, wenn man beabsichtigt z.B. Nano-Kapseln mit Wirkstoffen (z.B. Duftstoffen) reversibel an Textilien zu binden. Beim Waschen sollen die leeren Nano-Kapseln vom Textil abgelöst und nach dem Waschen mit neue Nano-Kapseln nachgeladen werden (<http://www.pharmazeutische-zeitung.de/index.php?id=517&type=0>, abgerufen am 10. Okt. 08).

Je tiefer die relative Luftfeuchtigkeit, desto grösser ist der Laplace (Unter-) Druck und somit die Kapillarkraft. Bei einer sehr geringen relativen Luftfeuchtigkeit von $< 10\%$ ($RH < 10\%$) (z.B. beim Trockenföhnen von feuchter Kinderkleidung) werden jedoch die Kapillarkräfte aufgrund sich verkleinernder Kapillaren meist schwächer als die Van-der-Waals-Kräfte.

(G) Kovalent gebundene NP an Faseroberfläche

Um die textile Ausrüstung gegenüber verschiedenen Einwirkungen möglichst persistent und langlebig zu machen, wird daran geforscht, NP oder NP-Agglomerate oder NP-Aggregate kovalent an die Faseroberflächen zu binden (z.B. Li et al. 2007). (Abb. 9)

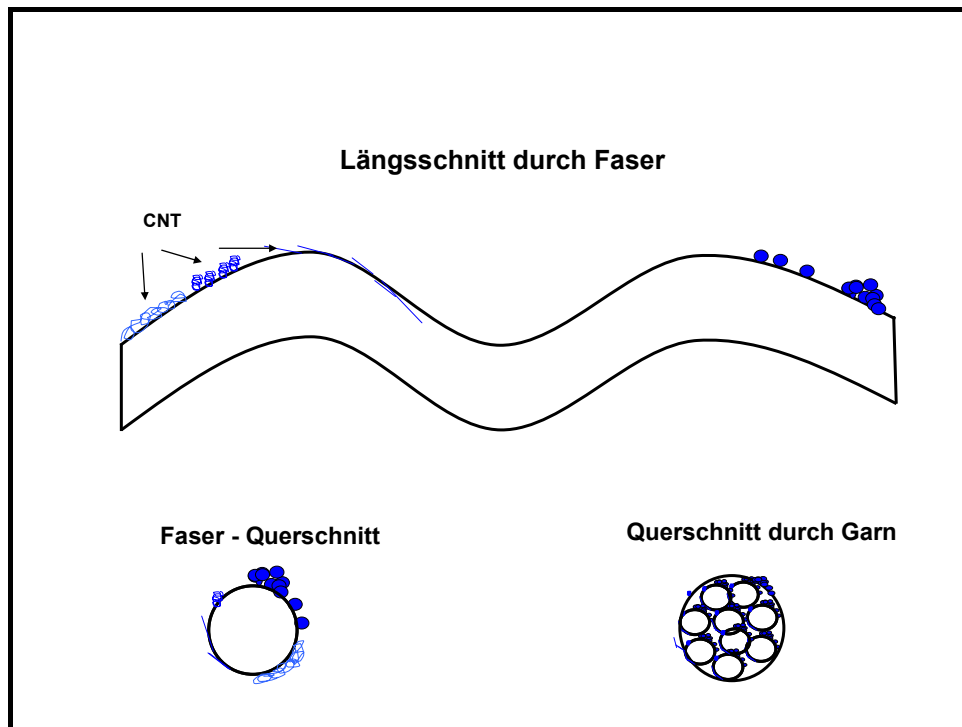


Abbildung 9 : Fasern, welche mit NP oder NP-Agglomeraten/Aggregaten ausgerüstet sind.

(H) NP in Polymerbeschichtungen

Eine Methode der Faserbeschichtung basiert auf der Abscheidung polymerer Materialien in Mikrometer oder Nanometer dünnen Schichten auf Textiloberflächen (Abb. 10a). Die zur Veredelung verwendeten Substanzen lassen sich auch mit partikelförmigen Additiven (z.B. Pigmente) kombinieren. Die Beschichtungen bestehen zumeist aus organischen Polymeren, die sich durch Vernetzung von Vorläufer-Substanzen in dünnen Schichten auf der Textiloberfläche abscheiden. Je nach Verarbeitungsverfahren kann man theoretisch zwei Möglichkeiten der Einbettung nanopartikulärer Additive in die Faserbeschichtung unterscheiden:

- a. Formschlüssige Einbettung der NP in das Volumen des polymeren Netzwerks der Beschichtung
- b. Zusätzliche kovalente Bindung zwischen NP und Polymerbeschichtung.

a. Im ersten Fall wird das einzelne NP vom Polymer einfach umhüllt und somit in Position gehalten. Hier kommt es auf die Dicke der Veredelungsschicht an, ob und in welcher Dichte die NP auf der Oberfläche der Faserbeschichtung liegen. Ist die Dicke der Veredelungsschicht geringer als der mittlere Durchmesser der NP, liegen diese in einer einzigen Lage auf der Faseroberfläche auf, die NP sind sozusagen aufgeklebt. Man kann davon ausgehen, dass die Fixierung der NP zusätzlich durch Oberflächenanziehung (zwischen Partikel, nicht zwischen Molekülen) und schwachen zwischenmolekularen Anziehungskräfte (Van-der-Waals-Kräfte) verstärkt wird.

b. Im zweiten Fall sorgt eine stabile kovalente Bindung zwischen NP und dem polymeren Netzwerk für zusätzlichen Halt. Dafür müssen die NP (meist auch die Faseroberfläche) zusätzlich funktionalisiert werden, um ausreichend viele chemische Bindungsstellen bereitzustellen. Die Funktionalisierung erfolgt durch chemische Vorbehandlung. Die Dicke der NP-haltigen Faserbeschichtung kann sehr gering sein (wenige Nanometer). Auch ist eine direkte chemische Verbindung zwischen den funktionalen Gruppen der NP und der Faseroberfläche möglich.

Die Stabilität der Beschichtung wird u.a. von folgenden Faktoren beeinflusst: Funktionalisierung des Textilmaterials (Faser, Beschichtung) und der NP, Alterungsbeständigkeit der Funktionalisierung (z.B. könnten photooxidative Reaktionen auf der NP Oberfläche dazu führen, dass die funktionellen Gruppen zerstört werden und damit die kovalente Verbindung zwischen NP und Polymer verschwindet), prozesstechnische Parameter, Verschleissfestigkeit der Beschichtung, evtl. nachträgliche Hochveredelung bei der die NP-haltige Schicht von weiteren Veredelungsschichten überlagert wird.

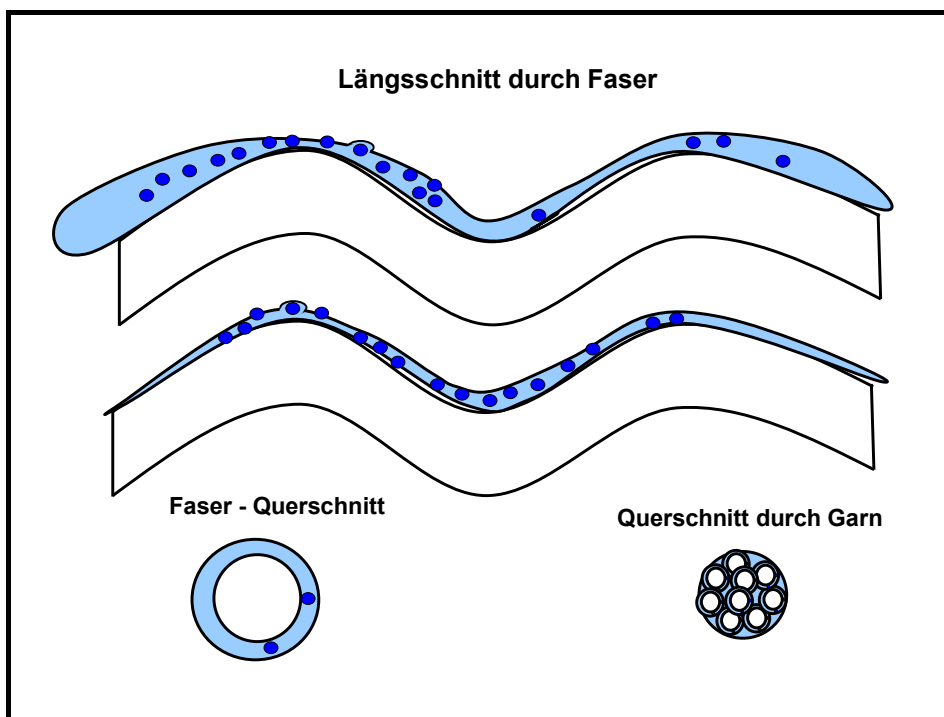


Abbildung 10a: Mikrometer oder Nanometer dünne Polymer- oder Xero-Gel-Beschichtung, NP entweder vollständig von Beschichtungsmaterial umgeben oder teilweise freiliegend.

Plasma-Verfahren

Mit Plasma-Verfahren können Fasern oder Textilien mit dünnen Polymerschichten im Mikrometer - oder Nanometer - Bereich beschichtet werden. Solche nanostrukturierten Schichten werden durch einen Niederdruck Plasmabeschichtungsprozess auf Textiloberflächen erzeugt (Hegemann & Balazs 2007). Bei der Abscheidung der plasmaförmigen Vorläufer-Substanzen (Kohlenwasserstoffe oder siliziumorganische Monomere) auf der Textiloberfläche bilden sich

Nanometer dünne Schichten, die je nach Prozessbedingungen dicht oder auch nanoporös sind. Die abgeschiedene Plasmapolymerschicht zeichnet sich durch hohe Dichte und einen sehr hohen Vernetzungsgrad der Kohlenwasserstoffmoleküle aus. Daraus resultiert eine grosse Waschbeständigkeit und Abriebfestigkeit der Beschichtung. Mittels Plasma-Co-sputtering können während des Schichtwachstums zusätzlich metallische oder metalloxidische NP in die nanoporöse Plasmapolymerschicht eingebracht werden. Die in-situ wachsenden NP werden von der Matrix der entstehenden Polymerschicht eingeschlossen, es bildet sich also eine NP-Kompositschicht auf der Faseroberfläche (s. Abb 10b, Körner et al. 2008). Die Fixierung der NP erfolgt durch Einbettung in die Polymermatrix. Über die Ausbildung von chemischen Bindungen zwischen Polymer und NP-Oberfläche gibt es mehrere Theorien (Nikolova 2005). Bei der Kondensation von Metallen aus der Gasphase auf einer Polymeroberfläche kondensieren zunächst sogenannte Adatome, aus denen durch Zusammenballung stabile Keime entstehen (Nikolova 2005). Aus diesen wiederum wachsen die metallischen NP auf der Polymeroberfläche und bilden mit dieser eine Grenzschicht (Interface). Bei der Plasmapbeschichtung wächst jedoch auch die Polymerschicht, was das Metall-Partikelwachstum begrenzen dürfte. Die Art der Grenzschicht bestimmt die Bindungsformen zwischen Metall-NP und Polymer.

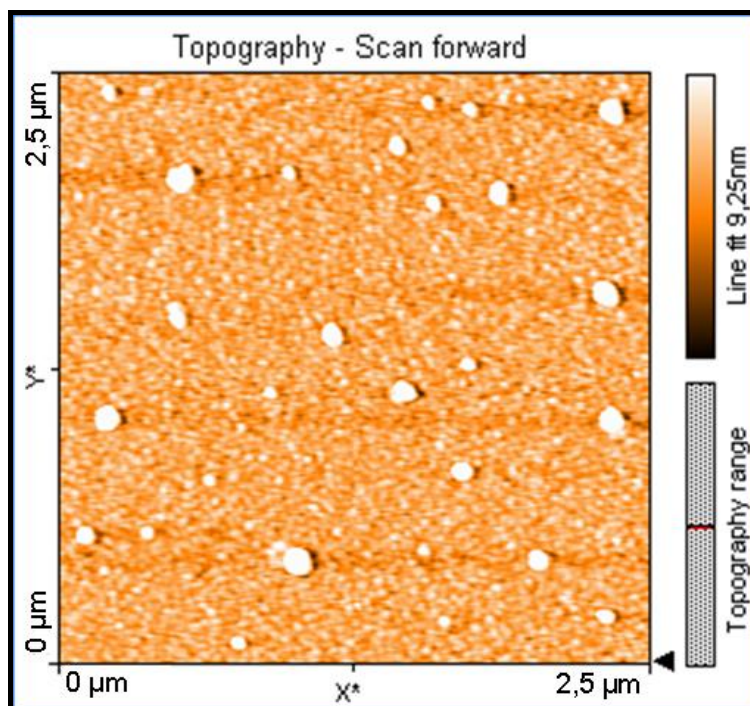


Abbildung 10b: AFM (atomic force microscope) - Aufnahme von Silber - Nanopartikeln in Plasma-Polymermatrix (funktionelle Kohlenwasserstoffmatrix) eingebettet (Körner et al. 2008)

(I) NP in Xero – Gel - Beschichtungen

Auf Sol-Gel Verfahren basierende Faserbeschichtungen wurden auf natürlichen und synthetischen Textilien sowie auf Mischgeweben erzeugt (Malthig et al. 2005). Das Verfahren ist ge-

eignet, metalloxidische (z.B. TiO_2 ,) als auch metallische NP (z.B. Ag) auf Faseroberflächen zu binden (10a). Die NP (nanoskalige Kondensate = „Nanokondensate“) werden im Sol-Gel in situ erzeugt oder es können aber auch nanopartikuläre Additive hinzugefügt werden. Bei den meisten Sol-Gel-Verfahren lösen sich die in situ erzeugten „Nanokondensate“ während des Beschichtungsprozesses wieder auf und werden als Moleküle oder Atome in die vernetzte Struktur der Beschichtung (Xero-Gel) kovalent integriert. Damit die Sol-Gel-Beschichtungen die gewünschten textilen Funktionen erfüllen, müssen NP nur in seltenen Fällen im Endprodukt (Xero-Gel) vorhanden sein (z.B. TiO_2 -NP für UV-Schutz, Ag-NP für antimikrobielle Funktion).

Die Größe der NP (z.B. nicht reines TiO_2 , sondern Agglomerate aus TiO_2 , Wasser und Sol) ist prozessabhängig und kann von wenigen Nanometern bis zu 500 nm reichen; es wurden auch Agglomerate von NP erzeugt. Üblicherweise sind die NP-Oberflächen funktionalisiert und durch kovalente Bindungen direkt oder mit Hilfe eines Haftvermittlers (Binder) auf Textiloberflächen fixiert. Als Binder fungiert ein aus dem Sol-Gel abgeschiedenes dreidimensionales TiO_2 oder SiO_2 Netzwerk (z.T. auch aus anorganisch/organischen Polymeren, sogenannten Hybridschichten). Die Dicke und die Porosität der Xero-Gel Beschichtung kann durch die Viskosität, die Verdünnung des Sol-Gels und die Auftragsprozesse gesteuert werden (Nanometer bis Mikrometer skalig). Wird eine Faser oder ein Textil beschichtet, so dringt die Beschichtung durch das Sol-Gel-Verfahren tiefer zwischen die Fasern ein als durch eine Plasmabeschichtung, die eher oberflächlich stattfindet.

Die NP-haltige Beschichtung scheint sehr stabil zu sein. In der Literatur wird berichtet, dass die Beschichtung auch nach mehreren Waschzyklen noch vorhanden ist. Die Xero-Gel Beschichtung scheint sogar die eingebetteten photokatalytisch aktiven TiO_2 -NP gut vor mechanischen Einwirkungen zu schützen (VDI 2007). Die Stabilität der Beschichtung wird u.a. von folgenden Faktoren beeinflusst: Textilmaterial, Vorbehandlung (Funktionalisierung) des Textilmaterials, Art und Zusammensetzung des Sol-Gels, prozesstechnische Parameter des Sol-Gel-Prozesses, evtl. nachträgliche Hochveredelung. Vermutlich können wegen dieser Einflussfaktoren in der Praxis unterschiedlich stabile Beschichtungen auf den Markt kommen. Die Stabilität (Abriebsfestigkeit, Waschbeständigkeit etc.) bestimmt die Qualität des textilen Produkts.

4.3 Integrationsmodelle ohne NP

Wie in 3.1. beschrieben erfüllen Nano - Textilien Funktionen , die auf den Effekten von nanoskaligen Strukturen beruhen. Diese nanoskaligen Strukturen ohne NP können folgendermassen beschaffen sein:

- Nanometer dünne Polymer-Beschichtungen ohne NP → Integrationsmodell (J)
- Nanometer dünne Xero-Gel-Beschichtungen ohne NP → Integrationsmodell (K)

- Mikrometer dünne polykristalline Keramik-Beschichtungen ohne NP → Integrationsmodell (L)
- Nano- und Mikrometer dünne Metall-Beschichtungen → Integrationsmodell (M)
- Nanostrukturierte Mikropartikel an Faser oder in Beschichtungen → Integrationsmodell (N)
- Nanometer dünne Polymerfilamente (Elektrospinning) ohne NP → Integrationsmodell (O)
- Self Assembled Monolayers (SAM) → Integrationsmodell (P)
- Nanoporöse Polymer-Fasern oder – Beschichtungen → Integrationsmodell (Q)
- Mikro- und nanostrukturierte Faseroberflächen → Integrationsmodell (R)

(J) Nanometer dünne Polymer-Beschichtungen ohne NP

Mit Hilfe verschiedener Veredelungs-Verfahren (z.B. Tauch-, Spraybeschichten, Foulard, Lösungs- und Dampfpolymerisation, Plasma), lassen sich Textilien oder Fasern mit Nanometer dünnen idealerweise gleichmässigen Polymerbeschichtungen ausrüsten (Abb. 11 oben). Nanometer dünne Beschichtungen aus leitenden Polymeren wie z.B. Polypyrrol oder Polyanilin können Textilien elektrische Leitfähigkeit verleihen (Foitzik et al. 2006, Dall'Acqua et al. 2006, Armes et al. 1991). Bei nicht ideal verlaufenden Herstellungsprozessen können Nanometer dünne ungleichmässig verteilte Polymer-Beschichtungen entstehen (Abb. 11 unten).

(K) Nanometer dünne Xero-Gel-Beschichtungen ohne NP

Mit dem Sol-Gel-Verfahren lassen sich Textilien oder Fasern mit Nanometer dünnen idealerweise kompakten Beschichtungen ausrüsten (Abb. 11 oben), die die Textilien zum Beispiel abriebresistent machen. Bei nicht ideal verlaufenden Herstellungsprozessen können Nanometer dünne, ungleichmässig verteilte Polymerbeschichtungen entstehen (Abb. 11. unten).

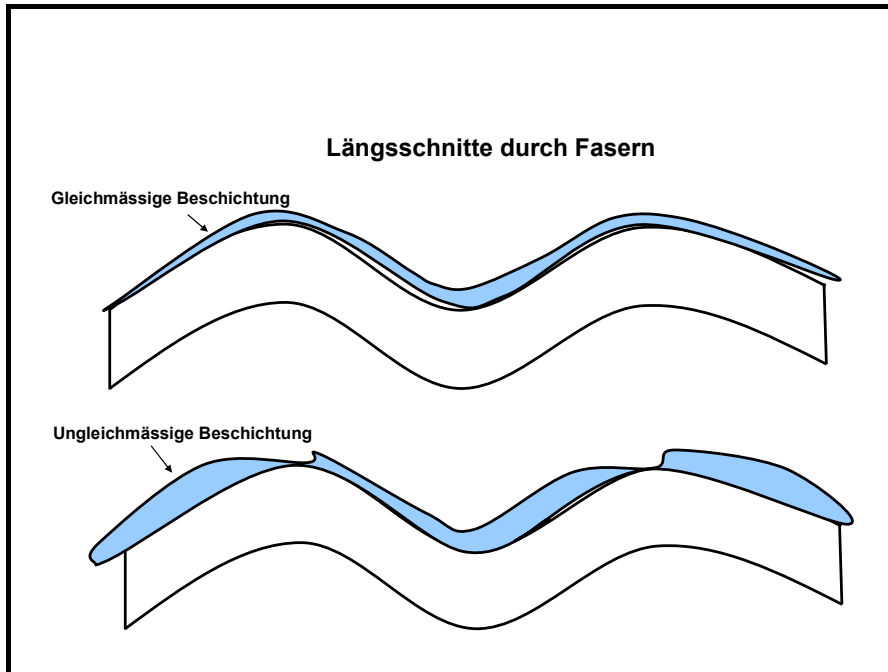


Abbildung 11: Nanometer dünne Polymer- oder Xero-Gel- oder Metall-Beschichtung ohne NP

(L) Mikrometer dünne polykristalline Keramik-Beschichtung ohne NP

Für Spezialanwendungen wie für technische Textilien werden auch keramische polykristalline Beschichtungen (Mikrometer dünne Schichten) erforscht, um z.B. abriebfeste Textilien herzustellen (Woudenberg et al. 2001). Die einzelnen Kristallkörner der polykristallinen Beschichtung können auch nanoskalig sein (Abb. 12). Diese Beschichtung ist nicht so elastisch wie die Polymer-Beschichtungen und verhält sich spröde.

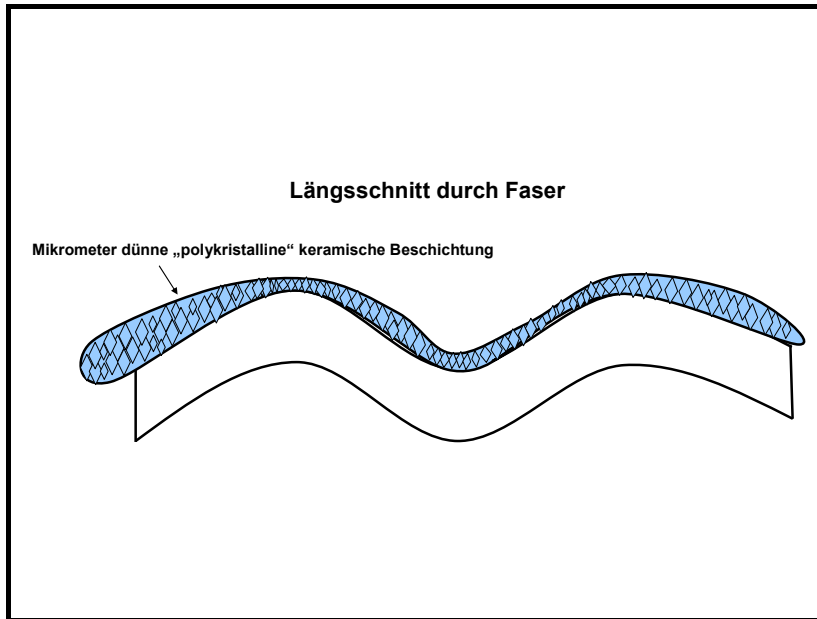


Abbildung 12: Mikrometer dünne polykristalline keramische Beschichtung (z.B. tetragonal-ZrO₂)

In einer Forschungsarbeit von Reifler et al. 2008 wurde nach Lösung gesucht, um die Elastizität zu erhalten und gleichwohl die Vorteile eines keramischen Materials (z.B. Resistenz gegenüber Hitze, Reibung und Licht) zu nutzen. Dazu wurden Al₂O₃ - Mikropartikel (ca. 2 µm) in Polyesterurethan Bindersystem eingebettet und Polyamid 6 Monofilamente damit beschichtet (Abb. 13). Es wäre auch möglich Al₂O₃- Nanopartikel einzubetten.

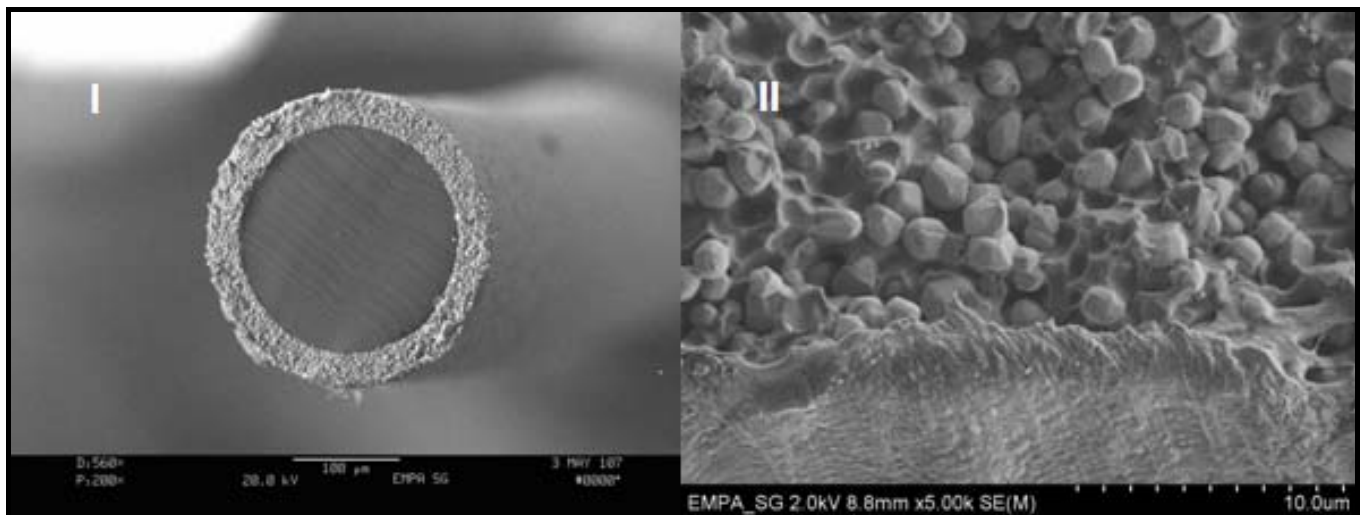


Abbildung 13: I) SEM (scanning electron micrograph) - Aufnahme eines Querschnittes einer Faser (PA 6), die mit einer Mikropartikel Al₂O₃ - Polymer-Matrix beschichtet ist; II) Al₂O₃ - Mikropartikel in der Polymermatrix eingebettet. (Reifler et al. 2008).

(M) Nano- und Mikrometer dünne Metall-Beschichtungen

Mit Hilfe verschiedener Verfahren können Textilien oder Fasern mit Nano- oder Mikrometer dünnen reinen Metallschichten beschichtet werden z.B. um leitfähige Textilien herzustellen. Mikrometer dünne Metallschichten sind von körniger Struktur und können sich eher spröde verhalten (Abb. 14). Diese körnigen Strukturen können Mikrometer- oder Nanometer skalig sein. Nanometer dünne Metallschichten sind hingegen glatt und elastisch und können mit dem Plasma-Verfahren auf Textilien oder Fasern aufgebracht werden (Abb. 11).

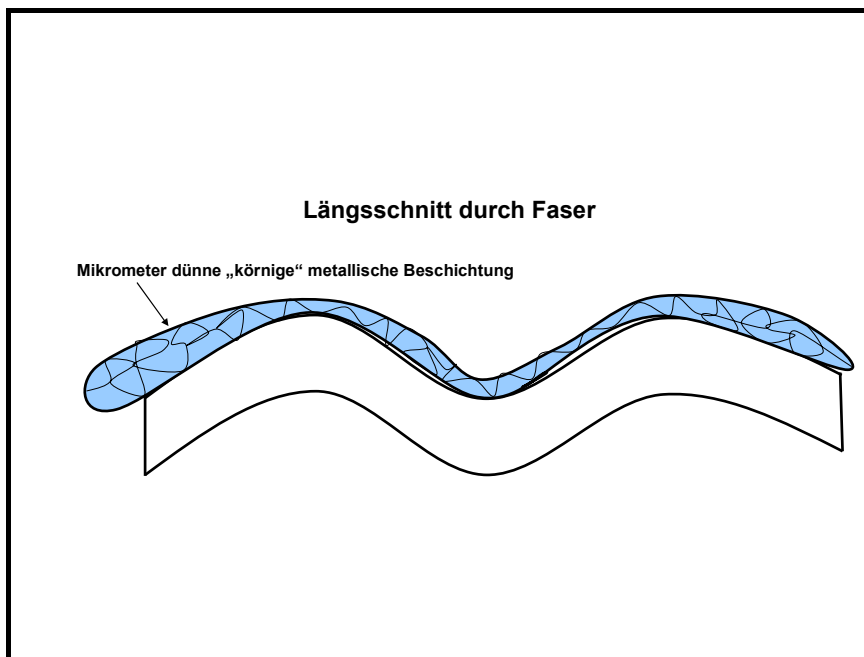


Abbildung 14: Mikrometer dünne körnige metallische Beschichtung.

(N) Nanostrukturierte Mikropartikel an Faser oder in Beschichtungen

Mikro- und Nanostrukturen werden kombiniert um wasser- und schmutzabweisende Textilien (Lotus-Effekt) zu erhalten. Dazu werden nanostrukturierte Mikropartikel mit hydrophoben (und z.T. oleophoben) Oberflächen auf Polymerfasern oder in Polymer-Beschichtungen auf das Textil aufgebracht (Tauch-, Spray-, Foulardverfahren) (Abb. 15). Hierzu eignen sich zum Beispiel nanostrukturierte SiO_2 – Mikropartikel, die mit Fluorosilanen hydrophob ausgerüstet werden. Zum Beispiel wird eine Suspension von Mikropartikeln in einem Lösungsmittel auf die Faser-Oberfläche gebracht. Das Lösungsmittel kann so gewählt werden, dass die Faser-Oberfläche etwas aufgelöst oder zum Schwellen gebracht wird. Wird das Lösungsmittel entfernt geht die Schwellung zurück und die Mikropartikel sind teilweise an der Oberfläche fixiert. Für temporäre Beschichtungen werden Lösungsmittel gewählt, die nicht mit der Faser-Oberfläche interagieren. Auf diese Art werden die Mikropartikel nur mit Van-der-Waals Bindungen an der Faser-Oberfläche fixiert (Oles et al. 2006).

Bisher wurde nicht systematisch untersucht, ob nanostrukturierte Mikrometer grosse Partikel (z.B. beschichtete Agglomerate/Aggregate) unter bestimmten Umwelt-Bedingungen in einzelne NP zerfallen oder ob sie stabil sind.

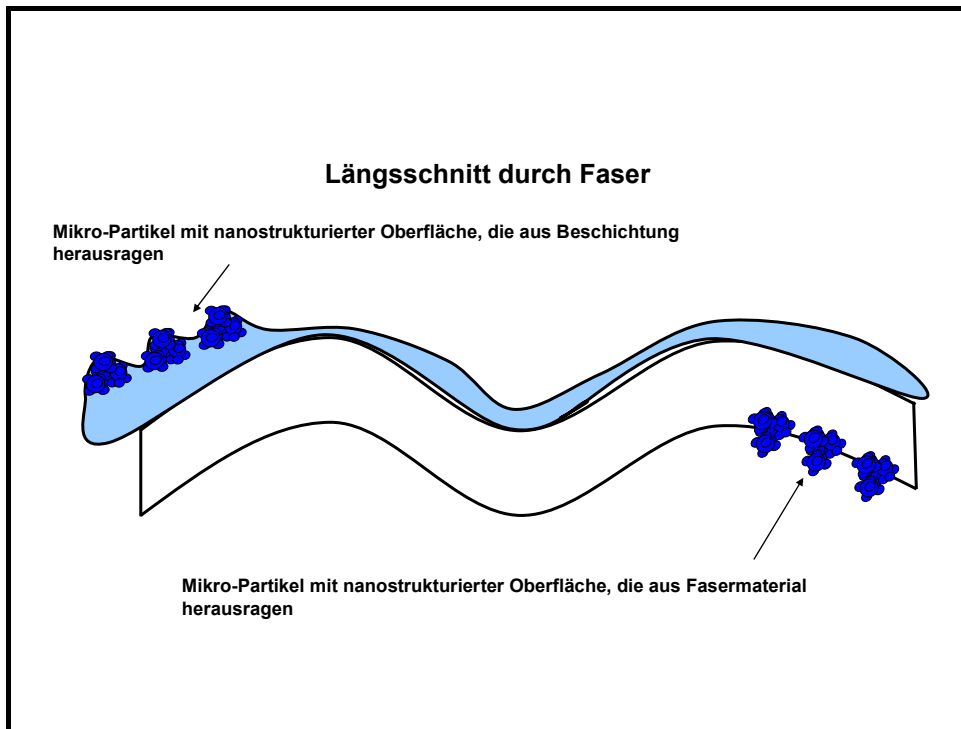


Abbildung 15: Mikro-Partikel mit nanostrukturierter Oberfläche auf Faseroberfläche oder in Beschichtung.

(O) Nanometer dünne Polymerfilamente ohne NP

Hier wird ein Polymer mit Elektrosinning verarbeitet, das keine Nanopartikel enthält, also kein NP - Komposit ist (für mehr Informationen s. (D) und Abb. 7) .

(P) Self Assembled Monolayers (SAM)

Auch das Gebiet der selbstorganisierenden Monoschichten soll hier kurz erwähnt werden, obwohl umstritten ist, ob es sich hier wirklich um Nanotechnologie oder eher herkömmliche Chemie handelt. Sogenannte self-assembled monolayers (SAM) entstehen, wenn Makromoleküle (meist organische) oder funktionalisierte NP sich in einer Dispersion auf Substratoberflächen (Maenosono et al. 2003) abscheiden (nanowerk, 2008). Die entstehende Nanoschicht besteht aus nur einer Moleküllage mit einer Dicke im Nanometerbereich (Abb. 16). Die Makromoleküle lagern sich mit einem affinen Molekülteil an einer ionischen Substratoberfläche an. Für diesen Zweck müssen die Textiloberflächen so funktionalisiert sein, dass ausreichend viele und gleichmässig dicht verteilte ionische Oberflächenladungen exponiert sind. Mögliche

Technologien zur Vorbehandlung der Textilien sind Plasma-, Ionenstrahl- oder chemische Behandlung. Die Selbstorganisation der Monoschichten geschieht durch gegenseitige Beeinflussung der Moleküle oder NP durch elektrostatische Effekte (Qian 2004). Diese selbstorganisierende Eigenschaft bleibt je nach Substanz auch nachträglich erhalten. Die Funktion von selbstorganisierenden Monoschichten auf Textilien ist ein Selbstheilungseffekt nach mechanischer Beschädigung (z.B. Abrieb). Dazu braucht es allerdings Depots für die aktive Substanz inner- oder unterhalb der Monoschicht.

Als ein Beispiel für Forschung an SAM im Textilbereich werden ITO-NP (Indium-Tin-Oxid) genannt. Zweck dieser Forschung ist die Entwicklung von multispektralen Tarnmaterialien. Ein weiterer Forschungsgegenstand sind ZnO-Nanorods, die radial um die Faseroberfläche herum wachsen und beim gegenseitigen Aneinanderreiben der Textil - Fasern während des Tragens Energie für Smart Textiles produzieren sollen (Qin et al. 2008).

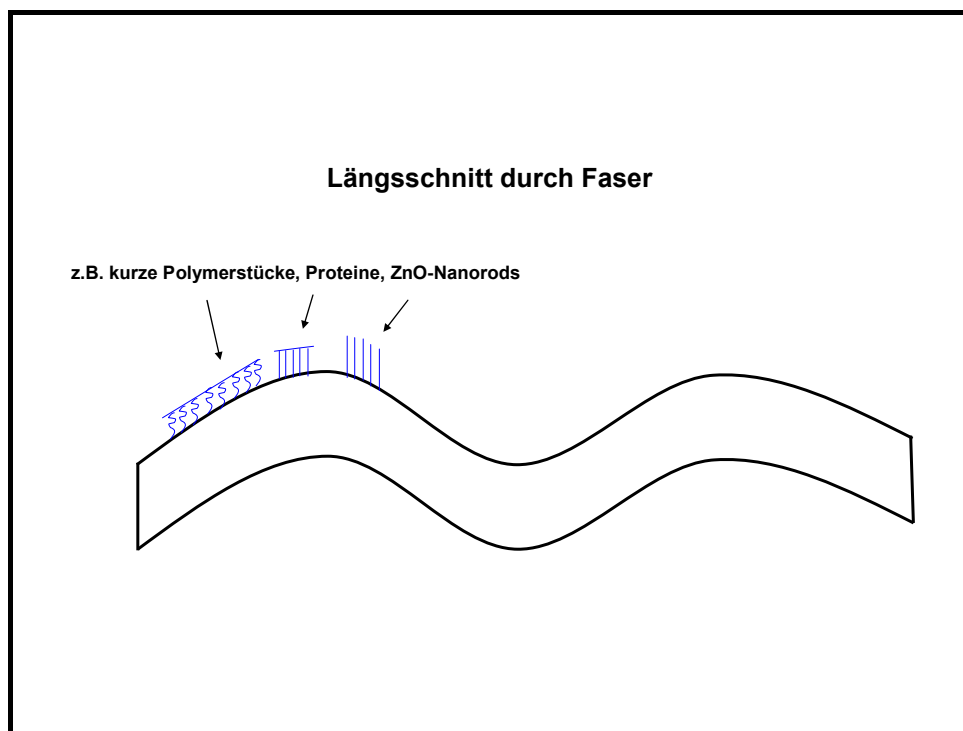


Abbildung 16: Self assembled monolayers (SAM).

(Q) Nanoporöse Polymer-Fasern oder – Beschichtungen

Materialien mit nanoskaligen Poren sind für verschiedene Anwendungen interessant, weil diese Materialien z.B. thermisch isolierend wirken und für die kontrollierte Freisetzung von Wirksubstanzen und als Umwelt-Filter eingesetzt werden können (Abb. 17). Sie können z.B. mit Sol-Gel-Prozess hergestellt werden (Luther et al. 2004).

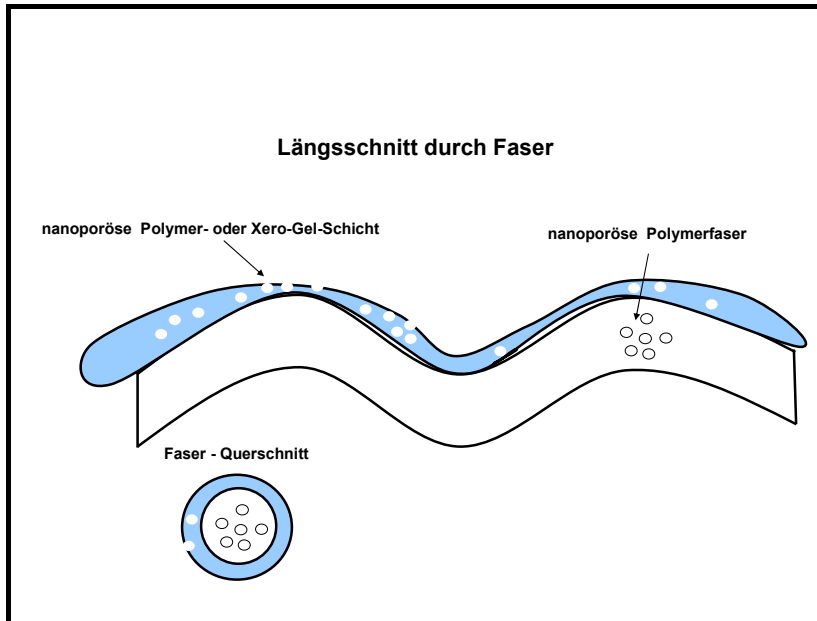


Abbildung 17: Nanoporöse Polymer-Fasern und – Beschichtungen

(R) Mikro- und nanostrukturierte Faseroberflächen

Fasern können mit Hilfe eines Prägeverfahrens an ihrer Oberfläche mikro- oder nanostrukturiert werden. Dadurch können zum Beispiel Farben über Diffraktion, also ohne Farbpigmente, erzeugt und die Fasern für leuchtende Textilien genutzt werden. Zudem können auch weitere Eigenschaften wie z.B. die Haftbarkeit der Fasern verbessert werden. Dies eröffnet Anwendungsmöglichkeiten in der Textil-, Bau- und Kunststoff-Industrie. (Schiff et al. 2006) (Abb. 18).

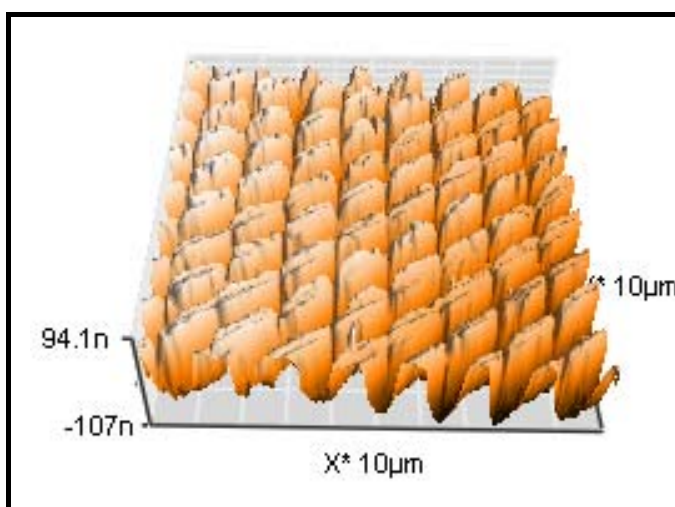


Abbildung 18: Mikrostrukturierte Faseroberfläche für reflektive optische Effekte..

5 Stabilität der Integration der NP

Wie in Kapitel 1 „Ausgangslage“ ausgeführt, ist die Freisetzung von synthetischen Nanopartikeln (NP) aus Textilien bisher nicht systematisch untersucht worden. Daher sind keine eindeutigen Aussagen über die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung der NP aus den Textilien beziehungsweise über die Stabilität der Integration der NP in Textilien möglich. Trotzdem sind in Teilbereichen theoretisches Wissen und Erfahrungen vorhanden, die in diesem Kapitel genutzt werden, um die Stabilität der Integration der NP in Textilien grob abzuschätzen.

5.1 Faktoren, welche die Stabilität der Integration der NP beeinflussen

Wie in den Integrationsmodellen (A) bis (I) dargestellt, können NP an ganz verschiedenen **Orten** in die Textilien integriert sein: in der Faser, auf der Faseroberfläche, in der Beschichtung. Abhängig vom Ort der Integration sind die NP äusseren Einwirkungen mehr oder weniger stark ausgesetzt.

Zudem kann die **Bindung der NP** an das Textilmaterial⁵ verschieden stark sein (kovalente Bindung, ionische Bindung, Wasserstoffbrücken - Bindung, Van-der-Waals Bindung). Ihr Stärkegrad hängt vor allem von folgenden Faktoren ab:

- Art der NP (chem. Zusammensetzung, Form etc.)
- Funktionalisierung der NP
- Art des Textilmaterials
- Alterungsbeständigkeit der NP-Funktionalisierung (z.B. könnten photooxidative Reaktionen auf der NP Oberfläche dazu führen, dass die funktionellen Gruppen zerstört werden und damit die kovalente Bindung zum Textilmaterial aufgelöst wird)
- vorhergehende Ausrüstung und nachträgliche Hochveredelung des Textilmaterials
- prozesstechnische Parameter während der Herstellung
- Weiterverarbeitung des Textilmaterials, z.B. Fasern werden gekräuselt

Wie stabil die NP in das Textil eingebunden sind, ist nicht nur von deren Bindung an das Textilmaterial abhängig, sondern auch von **Einwirkungen auf das Textil während seines Lebenszyklus (Produktion, Nutzung, Recycling/Entsorgung)**, welche das Textilmaterial oder die Bindung zwischen NP und Textilmaterial zerstören können:

- Reibung (Abrieb)
- Mechanische Belastung (wie z.B. Zug, Druck)
- UV
- Wasser (Regen, Waschen)

⁵ Unter Textilmaterial verstehen wir Faser- und Beschichtungsmaterial

- Schweiss
- Lösungsmittel (während Textilweiterverarbeitung, chemische Reinigung, organ./anorg. LM)
- Detergentien (Waschmittel)
- Temperaturschwankungen
- Hohe Temperaturen (bis zu 225°C bei der Textilveredelung)
- Materialalterung (Kombination von verschiedenen Einwirkungen, Strukturverlust der Polymerketten, Verlust von Weichmachern)

Die meisten Experten schätzen, dass Reibung und andere mechanische Belastungen (wie z.B. Zug, Druck), UV-Strahlung und Lösungsmittel relativ stark auf das Textilmaterial einwirken und zur Destabilisierung des Textilmaterials und auch zur Freisetzung von NP führen könnten. In BAG (2005) vermuten die Autoren, dass die Freisetzung von Substanzen aus Textilien während des Tragens v.a. durch Abrieb, Schweiss und Speichel verursacht wird.

Je nach **Art des Textilmaterials und dessen Verarbeitung** strapazieren die Einwirkungen das Textilmaterial unterschiedlich stark.

5.2 In welcher Form können NP freigesetzt werden?

Auf Grund der in 5.1 beschriebenen Einwirkungen verlieren Textilien während der Gebrauchsphase zwischen ca. 5% (Endlosfasern) bis im Extremfall 15-20% (kurzstapelige Fasern) ihres Gewichts. Es ist nicht bekannt, wie gross die Partikel sind, die durch normale Abnutzung von Textilien, die keine nanoskaligen Strukturen wie NP oder nanoskalige Beschichtungen enthalten, freigesetzt werden und zum Materialverlust beitragen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass auch aus Textilien, die keine NP enthalten, nanoskalige Partikel freigesetzt werden (Royal Commission on Environmental Pollution 2008).

Aus Nano - Textilien können theoretisch folgende nanoskalige Partikel freigesetzt werden:

- einzelne NP
- zu Mikrometer skaligen Partikeln agglomerierte NP
- Nanometer oder Mikrometer skalige Textilmaterialpartikel, welche NP enthalten
- nanoskalige Textilmaterialpartikel ohne NP

5.3 Abschätzung der Stabilität der Integration der NP

Die Abschätzung bezüglich der Freisetzung von NP aus Textilien beruht vor allem auf theoretischen Überlegungen, die noch nicht durch experimentelle Forschung belegt sind. Zudem sind viele Phänomene, welche im Grössenbereich der Nanometer auftreten, noch nicht abschliessend erforscht. Daher sind die folgenden Ausführungen und Abschätzungen nur

als Basis für weiterführende Freisetzungsexperimente und Diskussionen in Fachgremien zu sehen und nicht als abschliessende Beurteilung der Freisetzungspotentiale der NP aus Textilien.

Faserherstellung mit synthetischen NP:

Die **Integrationsmodelle (A) bis (D)** sind NP - Komposite, d.h. die Nanopartikel sind in der Polymer-Faser integriert. (A), (B) und (C) unterscheiden sich durch Form und chemische Zusammensetzung der eingebrachten NP: Komposite mit metallischen oder metalloxidischen NP (kugelförmige NP) (A), Komposite mit Ton-NP (plättchenförmige NP) (B), Komposite mit Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT, röhrenförmige hohle NP) (C). Nanometer dünne NP-Komposit-Fasern (D) unterscheiden sich von (A), (B) und (C) durch den Faser-Querschnitt, der hier viel dünner ist als bei (A), (B) und (C).

Die NP können formschlüssig durch das Polymer umgeben sein. Es scheint jedoch wahrscheinlich, dass ein Teil der durch „Compoundierung“ in das Polymer eingebrachten NP durch die Extrusion und durch Verstreckung und Verspinnung an die Oberfläche der Faser gelangen und dort teilweise „frei“ liegen. Bei Nanometer dünnen NP-Komposit-Fasern (D) scheint es wahrscheinlich, dass ein höherer Anteil der eingebrachten NP „frei“ an der Faser-Oberfläche liegt.

Die NP können mit Hilfe von Funktionalisierung des NP (z.B. chemische Modifikation der NP-Oberfläche) und/oder durch Vorbehandlung des Polymers **kovalent** an das Polymer gebunden werden. Nicht funktionalisierte NP sind meistens durch schwächere Bindungskräfte (ionische Kräfte, Wasserstoffbrücken, Van-der-Waals) ans Polymer gebunden.

Kleine Metall- und Metalloxid-NP (< 5 nm) tendieren im Polymer mit der Zeit dazu, mit ihresgleichen zu agglomerieren oder an die Oberfläche des Polymers zu drängen. Werden die NP gezielt funktionalisiert (durch Aenderung der chemischen Zusammensetzung und/oder Struktur der NP-Oberfläche) können die NP während der „Compoundierung“ besser vom Polymer **„benetzt“** und daran gehindert werden, im Polymer zu agglomerieren oder an die Oberfläche des Polymers zu drängen.

Auch die **photokatalytische Eigenschaft der NP** könnte auf die Stabilität der Integration einen Einfluss haben. Es wird vermutet, dass photokatalytisch aktive NP, wie z.B. TiO₂, Polymermoleküle in ihrer nächsten Umgebung zerstören und auch ihre kovalente Bindung an das Polymer schwächen können. Auf diese Art könnten die photokatalytisch aktiven NP die Alterung des Textilmaterials verstärken und unter bestimmten Einwirkungen freigesetzt werden.

Die **Ton-NP** werden in das Polymer eingebracht, und während des Prozesses der Einlagerung („Interkalation“) dringt das Polymer zwischen die Ton-Plättchen der Ton-NP ein und schiebt diese etwas auseinander. Um der Polymerfaser die erwünschte Funktion zu verleihen (z.B. Barrierewirkung), müssen die Ton-Plättchen durch „Exfoliation“ im Polymer seitlich

auseinandergezogen werden. Die Exfoliation scheint durch die grossflächige Bindung der Ton-Plättchen an das Polymer erschwert zu werden. Daher wird vermutet, dass die Ton-Plättchen sich stark an das Polymer binden.

Bei den **Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT)** scheint es einfacher zu sein, einwandige CNT (Single Walled Carbon Nanotubes, SWCNT) mit offenen Enden kovalent an das Polymer zu binden als mehrwandige CNT (Multi Walled Carbon Nanotubes, MWCNT) mit geschlossenen Enden. Das kommt daher, dass sich SWCNT besser mit chemischen Gruppen funktionalisieren lassen als die MWCNT und zudem die Funktionalisierung auch besser an offenen Enden funktioniert als an geschlossenen (s. (C)).

Integrationsmodell (E) steht für Fasern, die nur aus Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) bestehen. Die CNT können kovalent oder nur durch Van-der-Waals Bindungen aneinander gebunden sein. Um die CNT kovalent aneinander zu binden, müssen diese speziell funktionalisiert werden.

Veredelung mit synthetischen NP

Bei den **Integrationsmodellen (F) und (G)** sind die NP einzeln oder als „Cluster“ (agglomerierte oder aggregierte NP) auf der Faseroberfläche aufgebracht: nicht kovalent gebundene NP an Faseroberfläche (F), kovalent gebundene NP an Faseroberfläche (G). Kovalent gebundene NP haften unter äusseren Einwirkungen stabiler an der Faseroberfläche als nicht kovalent gebundene NP. Vorausgesetzt, dass die NP gezielt funktionalisiert werden und das Textilmaterial gezielt vorbehandelt wird, können alle Arten von NP an alle Arten von Textilmaterialien kovalent gebunden werden. Nicht kovalent gebundene NP können auch mit Van-der-Waals-Bindungen relativ stabil ans Textilmaterial gebunden sein, solange nicht gewisse Faktoren, wie zum Beispiel Wasser, auf das Textil einwirken.

Bei den **Integrationsmodellen (H) und (I)** sind die synthetischen NP in einer Beschichtung auf das Textil aufgebracht: NP in Polymerbeschichtungen (H), NP in Xero-Gel-Beschichtungen (I). Wie stabil die NP in der Beschichtungsmatrix gebunden sind, hängt wie bei den Integrationsmodellen (A) bis (D) von der photokatalytischen Aktivität, der „Benetzbarkeit“ der NP und von der Bindung zwischen NP und Textilmaterial ab. Zusätzlich spielt hier die Kombination von Beschichtungs- und Fasermaterial eine Rolle: Mikrometer dünne Beschichtungen können oft mit der Verformbarkeit (bzw. Elastizitätsmodul = E-Modul) des Fasermaterials nicht mithalten und verhalten sich spröde, was zur Freisetzung von schwach gebundenen NP führen könnte. Im Gegensatz dazu verhalten sich Nanometer dünne Beschichtungen (sogar, wenn sie aus purem Metall oder aus Keramik bestehen) relativ elastisch. Andererseits steigt bei der Xero-Gel-Beschichtung mit der Schichtdicke auch die Abriebsfestigkeit, was die Integration der NP wiederum stabilisieren könnte.

Integrationsmodelle ohne synthetische NP

Die Integrationsmodelle (J) bis (R) enthalten keine NP, daher werden auch keine NP freigesetzt. Jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass unter bestimmten Einwirkungen auf Textilien nanoskalige Partikel aus den Nanometer dünnen Beschichtungen oder Nanometer dünnen Fasern herausbrechen (Buzea et al. 2007).

Abschätzung der Stabilitätsfaktoren

Bisher fehlen wissenschaftlich fundierte experimentelle Resultate zur Freisetzung von NP aus Textilien. Die vorgängig beschriebenen Überlegungen basieren auf dem heutigen Stand des theoretischen Wissens und der anwendungsspezifischen Erfahrungen und nicht auf experimentellen Untersuchungen. Vor diesem Hintergrund scheinen vor allem die in Tabelle 2 aufgelisteten Faktoren die Stabilität der Integration der NP in Textilien zu bestimmen. Zudem ist auch die Alterungsbeständigkeit der Textilmaterialien, der NP und deren Funktionalisierung ein wichtiger Faktor für die Stabilität. Die in Tabelle 2 dargestellte Abschätzung widerspiegelt den aktuellen Kenntnisstand und das derzeitige Meinungsbild und muss zukünftigen wissenschaftlichen Erkenntnissen angepasst werden.

	Stabilität der Integration der NP	
„Stabilitäts“-Faktoren	tendenziell höher	tendenziell geringer
Bindung zwischen NP und Faser- oder Beschichtungsmaterial	kovalente Bindung	keine kovalente Bindung
Photokatalytische Aktivität der NP	NP nicht photokatalytisch aktiv	NP photokatalytisch aktiv
Art des Textilmaterials	NP in abriebfestem Faser- oder Beschichtungsmaterial	NP in wenig abriebfestem Faser- oder Beschichtungsmaterial
„Benetzbarkeit“ der NP	NP werden gut durch das Faser- oder Beschichtungsmaterial „benetzt“	NP werden schlecht durch das Faser- oder Beschichtungsmaterial „benetzt“
Ort des NP	NP formschlüssig von Faser- oder Beschichtungsmaterial umgeben	NP an der Oberfläche des Faser- oder des Beschichtungsmaterials teilweise freiliegend
	NP in Kernfaser	NP in Mantelfaser
	NP in Faser	NP in Beschichtung
	NP in beschichteten Fasern (mit Barrierschicht)	NP in nicht beschichteten Fasern
Kombination Beschichtungs- und Fasermaterial	NP in elastischer Beschichtung	NP in spröder Beschichtung

Tabelle 2: Tendenzielle Abschätzung der Faktoren, welche die Stabilität der Integration der NP in Textilien beeinflussen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es besteht eine Vielfalt an Möglichkeiten, synthetische Nanopartikel (NP) in Textilien zu integrieren. Einerseits können NP bei der Herstellung von Chemiefasern in das Faservolumen eingebracht werden oder Fasern können aus NP hergestellt werden (z.B. Fasern aus Kohlenstoffnanoröhrchen). Andererseits können Natur- und Chemiefasern mit NP an der Faseroberfläche „veredelt“ werden. Hierbei werden die NP entweder direkt oder in unterschiedlichen Beschichtungen auf die Faseroberfläche (bzw. Textiloberfläche) aufgebracht. Theoretisch ist es möglich, alle Arten von NP in alle Arten von Textilmaterialien zu integrieren. Von den in diesem Bericht dargestellten Modellen sind wahrscheinlich erst wenige auf dem Markt.

Bisher gibt es kaum Studien zur Freisetzung von NP aus Nano-Produkten. Die ersten Studien geben aber Hinweise, dass die Art der Integration der NP in Textilien die unbeabsichtigte Freisetzung der NP beeinflusst. Gemäss dem heutigen Stand des Wissens und der Erfahrungen wird vermutet, dass die folgenden Faktoren massgeblich die Stabilität der Integration der NP in Textilien beeinflussen: Ort des NP im Textil, Art der Bindung zwischen NP und Textilmaterial, photokatalytische Eigenschaft der NP, Art des Textilmaterials, „Benetzbarkeit“ der NP durch das Textilmaterial, Kombination Faser- und Beschichtungsmaterial, die Alterungsbeständigkeit der Textilmaterialien, der NP und deren Funktionalisierung. Die Bindung zwischen NP und Textilmaterial basiert auf der Funktionalisierung der NP und der Vorbehandlung des Textilmaterials. Die „Benetzbarkeit“ der NP basiert auf der Kombination der NP mit dem Textilmaterial und der Funktionalisierung der NP. Wie stabil die NP im Textil integriert sind, ist auch davon abhängig, welchen Einwirkungen das textile Endprodukt wie häufig während seines Lebenszyklus ausgesetzt wird. So wird zum Beispiel ein T-Shirt häufiger gewaschen als ein Vorhang und ist dadurch stärker bestimmten Einwirkungen wie Detergentien, Reibung und Wasser ausgesetzt.

Im Moment wird angenommen, dass vor allem Mitarbeiter bei der Herstellung und Verarbeitung von pulverförmigen NP exponiert sind. Daher wird empfohlen, die NP in geschlossenen Systemen oder „in situ“ während des Verarbeitungsprozesses zu generieren oder in nass-chemischer Form (Suspension oder Dispersion) zu verarbeiten (Schulte et al. 2008). In der Gebrauchsphase werden die NP am wahrscheinlichsten während des Waschens (Detergentien, Reibung, Wasser) unbeabsichtigt aus dem Textil freigesetzt. Hier stellt sich die Frage, ob die NP in der Kläranlage aufgefangen und/oder abgebaut werden oder ob sie in die Umwelt gelangen (Limbach et al. 2008). Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass auch während des Benutzens von Textilien durch Reibung, Feuchtigkeit oder Schweiß unabsichtlich NP freigesetzt werden. Was mit Nanomaterialien während der Recycling- oder Entsorgungsprozesse passiert, ist noch nicht untersucht (Köhler et al. 2007). Franco et al. (2007) schlägt vor, für eine Regulierung der Nanomaterialien zu unterscheiden, ob NP während des ganzen Lebenszyklus im Produkt stabil integriert bleiben oder ob sie irgendwann freigesetzt werden und in die Umwelt gelangen könnten.

Aus NP-freien Nano-Textilien, wie z.B. nanoporöse Textilien oder Textilien aus Fasern mit nanoskaligem Durchmesser (Nanofasern), können natürlich keine NP freigesetzt werden. Jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch aus NP-freien Nano-Textilien nanoskalige Partikel freigesetzt werden können. So vermutet die Royal Commission on Environmental Pollution (2008), dass aus Textilien aus Nanofasern, nanoskalige Partikel während des Tragens und Waschens freigesetzt werden könnten.

Die Stabilität der Integration der NP geht einher mit der Sicherheit der Nano-Textilien, aber auch mit der Qualität der textilen Endprodukte: Werden NP unabsichtlich freigesetzt, so verliert das Textil unter Umständen die erwünschte Funktion oder kann diese gar nicht erfüllen. Um qualitativ hochstehende Produkte zu entwickeln, muss also auch auf die Stabilität der Integration geachtet werden.

In Zukunft müssen die in diesem Bericht vermuteten Zusammenhänge und Abschätzungen durch experimentelle Forschung erhärtet werden und zusätzlich müssen weitere offene Fragen untersucht werden, zum Beispiel ob:

- die integrierten NP das Recycling von Materialien erschweren;
- es bei der Herstellung wie beim Recycling auch zur „cross product contamination“, also Verunreinigung anderer Produkte kommen könnte. Zum Beispiel werden ein Teil der Textilien als Füllmaterial für Kunststoffteile oder als Dämm-Material in der Auto-industrie verwertet.

Die Nanotechnologie bietet trotz der vielen noch offenen Fragen interessante Möglichkeiten für innovative und nachhaltige Textilien. Die Nanotechnologie könnte dazu beitragen, den Material-, Chemikalien- und Energieverbrauch und die Abfallmenge zu senken, und dieses Potential sollte genutzt werden. Jedoch sollten der mögliche Mehrwert der Verwendung der NP in Textilien genau abgeklärt und auch mögliche NP-freie Alternativen (Nanomaterialien ohne NP oder Nicht-Nanomaterialien) geprüft werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir all jenen Experten danken, die mit ihrem Fachwissen und Erfahrungen zu dem Inhalt dieses Berichtes wesentlich beigetragen haben:

Dr. P. Brühwiler, Empa
Prof. Dr. T. Butz, Universität Leipzig
Dr. S. Derler, Empa
Dr. T. Geiger, Empa
Dr. T. Graule, Empa
A. Gunkel, Keller AG
Dr. D. Hegemann, Empa
Dr. M. Heuberger, EMPA
Dr. M. Hirayama, ZHAW
Dr. J. Höck, Tamas
Dr. H. Lutz, CHT Beitling GmbH
Dr. J. Patschneider, Empa
Dr. V. Richter, Fraunhofer Institut
Dr. F. Tabellion, Bühler PARTEC GmbH
Dr. A. Ulrich, Empa
Dr. Waeber, bluesign technologies ag

Die Kommission für Umwelt und Technologie (KUT), des TVS Textilverband Schweiz (www.swisstextiles.ch) hat diesen Bericht zusammen mit der Empa finanziert und mit ihrem fachlichen Wissen unterstützt. Für diese wertvolle Unterstützung danken wir den Mitgliedern der KUT:

M. Bickel, TVS Textilverband Schweiz
P. Eschler, Chr. Eschler AG
S. Gleich, Kuny AG
A. Gunkel, Keller AG
W. Huber, Hermann Bühler AG
U. Isler, C. Beerli AG
J. Lingg, Mammut Sports Group AG
M. Rüedi, EMPA

Die Verantwortung für diesen Bericht tragen ausschliesslich die Autoren.

Literatur

- Armes S.P. et al., 1991: *Morphology and structure of conducting Polymers*. *Langmuir*, 7(7) p 1447-1452
- BAG 2005: *Chemikalien in Textilien Literaturstudie, Modellbildung und Priorisierung nach eventuellen gesundheitlichen Risiken von Textilhilfsmitteln*, S 148
- Bazbouz M.B. and Stylios G.K., 2008: *Alignment and optimization for nylon 6 nanofibers by electrospinning*, *Journal of Applied Polymer Science*, 107/5, p 3023 - 3032
- Benn T., Westerhoff P., 2008: *Nanoparticle Silver Released into Water from Commercially Available Sock Fabric*, *Environmental Science and Technology* 42 (11) p 4133-4139
- Beyer G., 2002: *Short communication: Carbon nanotubes as flame retardants for polymers*. *Fire and Materials*, 26(6) p 291-293
- BMBF 2008: *Nanopartikel – kleine Dinge grosse Wirkung*
http://www.bmbf.de/pub/nanopartikel_kleine_dinge_grosse_wirkung.pdf
- Bhattacharyya, A.R., et al., 2003: *Crystallization and orientation studies in polypropylene/single wall carbon nanotube composite*. *Polymer*, 44(8) p 2373-2377
- Bhattacharyya A.R., Pötschke P., and et. al., 2004: *Effect of encapsulated SWNT on the mechanical properties of melt mixed PA12/SWNT composites*. *Chemical Physics Letters*, 392(1-3) p 28-33
- Bourbigot S., Devaux E., and Flambard X., 2002: *Flammability of polyamide-6 /clay hybridnanocomposite textiles*. *Polymer Degradation and Stability*, 75(2) p 397-402
- Bourbigot S., et al., 2004: *Solid state NMR characterization and flammability of styreneacrylonitrile copolymer montmorillonite nanocomposite*. *Polymer*, 45(22) p 7627-7638
- Brückmann R., Koch M., and Lutz H., 2006: *Erfolgreiche Übertragung des nanotechnologischen Sol-Gel-Prozesses auf Textilien*. *Textilveredlung*, 41(11/12) p 4-8
- Buzea C., Pacheco I.I., Robbie K., 2007: *Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity Biointerphases* 2(4) p 17 -71
- BSI (British Standards Institution), 2007: *Guidance on the labelling of manufactured nanoparticles and products containing manufactured nanoparticle*, PAS
- Chang T.E., et al.; 2005: *Microscopic mechanism of reinforcement in single-wall carbon nanotube/polypropylene nanocomposite*. *Polymer* 46(2) p 439-444
- CIRFS (Comité International de la Rayonne et des Fibres Synthétiques), 2008: <http://www.cirfs.org>
- Dai T.-H., Yu H., Zhang K. et al., 2008: *Fabricating novel thermal crosslinked ultrafine fibers via electrospinning*, *Journal of Applied Polymer Science* 107(4) p 2142 - 2149
- Dall'Acqua L., et al., 2006: *Vapor phase polymerisation of pyrrole on cellulose-based textile substrates*. *Synthetic Metals*, 156(5-6) p 379-386.
- Dekkers S., Prud'homme De Lodder L.C.H., de Winter R., Sips A.J.A.M., de Jong W.H., 2007: *Inventory of consumer products containing nanomaterials RIVM/SIR Advisory report 11124 Version July 27,*
- Erickson J., 2003: *Incorporating carbon nanotubes into polypropylene fibres*. North Carolina State University.
- Foitzik R.C., Kaynak A., and Pfeffer F.M., 2006: *Application of soluble poly (3-alkylpyrrole) polymers on textiles*. *Synthetic Metals*, 156(7-8) p 637-642
- Franco A., Hansen S. F. , Olsen S. I., Butti L., 2007: *Limits and prospects of the “incremental approach” and the European legislation on the management of risks related to nanomaterials*, *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 48, p 171–183

- Gottschalk F., 2006: *Umwelt- und Gesundheitseinwirkungen von Kohlenstoff-Nanoröhren (carbon nanotubes). Entwurf einer Risikobewertung mit besonderer Betrachtung potenzieller Applikationen in textilen Fasern*, an Fernuniversität Hagen, ETH Zürich.
- Hegemann D., Hossain M.M. and Balazs D., 2007: *Nanostructured plasma coatings to obtain multifunctional textile surfaces*. *Progress in Organic Coatings* 58 (2-3), p 237-240
- Huang C., Chen S., Lai C., Reneker D.H., Qiu H., Ye Y., and Hou H., 2006: *Electrospun polymer nanofibers with small diameters*, *Nanotechnology* 17, p 1558–1563
- Huang Z.-M., Zhang Y.-Z., Kotaki M., and Ramakrishna S., 2003: *A review on polymer nanofibres by electrospinning and their applications in nanocomposites*, *Comp. Sci. Tech.* 63, p 2223–2253
- ISO, 2007: *TECHNICAL SPECIFICATION Nanotechnologies — Terminology and definitions for nanoparticles*, Draft ISO/TS 27687
- Jeong S.H., Yeo S.Y., and Yi S.C., 2005: *The effect of filler particle size on the antibacterial properties of compounded polymer/silver fibers*. *Journal of Materials Science*, 40(20) p 5407-5411
- Köhler A. R., Som C., Helland A., Gottschalk F., 2008: *Studying the potential release of carbon nanotubes throughout the application life cycle*, *Journal of Cleaner Production*, 16 (8-9) p 927 - 937
- Körner E., Fortunato G., Hegemann D., 2008: *Plasma Process. Polym.*, DOI: 10.1002/ppap.200800102
- Krüger A., 2004: *Kohlenstoff-Nanoröhren: Substrate für eine neue Chemie?* in *Nachrichten aus der Chemie*, p 909-912
- Lee, H.J., Yeo S.Y. and Jeong S.H., 2003: *Antibacterial effect of nanosized silver colloidal solution on textile fabrics*. *Journal of Materials Science*, 38(10) p 2199-2204
- Li D. and Sun G., 2007: *Coloration of textiles with self-dispersible carbon blacknanoparticles*. *Dyes and Pigments*, 2007. 72(2) p 144-149
- Li X., Yao C., Sun F et al. 2008: *Coniugate electrospinning of continuous nanofiber yarn of poly(L-lactide)/nanotricalcium phosphate nanocomposite*, *Journal of Applied Polymer Science* 107(6) p 3756 – 3764
- Li Y.L., Kinloch I.A., Windle A.H., 2004: *Direct spinning of carbon nanotube fibers from chemical vapor deposition synthesis*, *Science* 304(5668) 276–27
- Limbach L.K., Bereiter R., Müller E., Krebs R., Gälli R., and Stark W.J., 2008: *Removal of Oxide Nanoparticles in a Model Wastewater Treatment Plant: Influence of Agglomeration and Surfactants on Clearing Efficiency*, p 5828 - 5833; DOI: 10.1021/es800091f
- Liu Y.Y., et al., 2007: *Artificial lotus leaf structures from assembling carbon nanotubes and their applications in hydrophobic textiles*. *Journal of Materials Chemistry*, 17(11) p 1071-1078
- Lübben J., 2005: *Funktionale Fasern und Textilien. tec21: Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt*, 41 p 10-13
- Luther (Ed.) *Industrial application of Nanomaterials - chances and risks*, VDI 2004
- Maenosono S., Okubo T., Yamaguchi Y., 2003: *Overview of nanoparticle array formation by wet coating*, *Journal of Nanoparticle Research* 5 p 5–15
- Malthig B., Haufe H. and Boettcher H., 2005: *Functionalisation of textiles by inorganic sol-gel coatings*, *Journal of Materials Chemistry* 15, 4385–4398
- McNally T., 2004: *Nanotechnology in Textiles*. in *Breakfast Seminar. Ramada Hotel: Materials Research Group School of Mechanical Engineering, Queen's University Belfast*.
- Musil D., Jirsak O., Sanetrik F. et al., 2007: *Textiles containing at least one layer of polymeric nanofibres and method of production of the layer of polymeric nanofibres from the polymer solution through electrostatic spinning*, *Extracts from European Patent Applications, Part 1 B: Primary Industry, Fixed Constructions, Mining* 23(52) p 5448

- Nakayama A., Takahashi R., Hamano T. et al., 2008: Morphological study on electrospun nanofibers of aromatic polyesters (Japanese), *Sen'i Gakkaishi* 64(1) p 32-35
- Nanowerk:
http://www.nanowerk.com/nanotechnology/introduction/introduction_to_nanotechnology_6.html (abgerufen am 12. Oktober 2008)
- Nikolova D., 2005: Charakterisierung und Modifizierung der Grenzflächen im Polymer-Metall-Verbund, in *Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät 2005*, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg: Halle (Saale)
- Park J.H, Kom B.S., Yoo Y.C., et al. 2008: Enhanced mechanical properties of multilayer nano-coated electrospun nylon 6 fibers via layer-by-layer self assembly, *Journal of Applied Polymer Science*, p 2211-2216
- Patanaik A., Anandjiwala R.D., Rengasamy R.S., Ghosh A., and Pal H., 2007: Nanotechnology in fibrous materials – a new perspective, *Textile Progress* 39 (2) p 67–120
- Persico P., Carfagna C., and Musto P., 2006: Nanocomposite fibers for cosmetotextile applications. *Macromolecular Symposia*, 234 p 147-155
- Oles et al., 2006: United States Patent Application Publication, Pub. No.: US 2006/0222815 A1, Pub. Date: Oct. 5, 2006
- Qian L., 2004: Nanotechnology in textiles: Recent developments and future prospects. *AATCC Review*, 4(5) p 14-16
- Qin Y., Wang X. and Wang Z.L., 2008: Microfibre–nanowire hybrid structure for energy scavenging, *nature*, 45, p 14 doi:10.1038
- Reifler F., Clemens, F., Sánchez, F. A. L., Varga K., Hufenus, R., 2008: Dip coating of synthetic fibres with a composite system, presented at the Fiber Society, Spring Conference, May 14 - 16, 2008 University de Haute Alsace, F-Mulhouse
http://www.thefibersociety.org/Assets/Past_Meetings/PastMtgs_Home.html
- Royal Commission on Environmental Pollution: Novel Materials in the Environment: The case of nanotechnology, CHAIRMAN: SIR JOHN LAWTON CBE, FRS, Twenty-seventh Report, November 2008
- Royal Society, 2004: The Royal Society and The Royal Academy of Engineering, Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties, Royal Society Policy Document 19/04, London, <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>
- SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks), 2007: The existing and proposed definitions relating to products of nanotechnologies, 29 November 2007
- Schift H., Halbeisen M., Schütz U., Delahoche B., Vogelsang, K. Gobrecht J., 2006: Surface structuring of textile fibers using roll embossing, *Microelectronic Engineering* 83 p 855 - 858
- Schulte P.I, Geraci C., Zumwalde R., Hoover M., and Kuempel E., 2008: Occupational Risk Management of Engineered Nanoparticles, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5:4, 239 – 249 DOI: 10.1080/15459620801907840
- Siegfried B., 2007: NanoTextiles: Functions, nanoparticles and commercial application, ETHZ/Empa/TVS, St. Gallen, S 44
- Som C., Halbeisen M., Koehler A., 2008: Einschätzungen zu „Nano“-Textilien und Entwicklungstrends - Umfrage. Empa/TVS St. Gallen, S 6
- VCI 2008, Responsible Production and Use of Nanomaterials, 23.Juni 08:
http://www.vci.de/template_downloads/tmp_VCIInternet/Nano_Responsible_Production~DokNr~122306~p~101.pdf
- VDI/VDE-IT |11|07|AZ|203, 2007: Photokatalytisch aktive Faserwerkstoffe für innovative Umwelttechnologien
- Woudenberg F. C. M., Sager W. F. C., Sibelt N. G. M., and Verweij H., 2001: Dense Nanostructured t-ZrO₂ Coatings at Low Temperatures via Modified Emulsion Precipitation, *Adv. Mater.* 13 (7) p 514 – 516

- Yeo S.Y., Lee H.J., and Jeong S.H., 2003: Preparation of nanocomposite fibers for permanent anti-bacterial effect. *Journal of Materials Science* 38(10) p 2143-2147
- Yuranova T., et al. 2006: Performance and characterization of Ag-cotton and Ag/TiO₂ loaded textiles during the abatement of E-coli. *Journal of Photochemistry and Photobiology a-Chemistry*, 181(2-3) p 363-369
- Zhou F.-L., Gong R.-H., 2008: Review Manufacturing technologies of polymeric nanofibres and nanofibre yarns, *Polymer International*, 57 p 837–845

Glossar und Abkürzungen

E-Modul (Elastizitätsmodul): „Der Betrag des Elastizitätsmoduls ist um so größer, je mehr Widerstand ein Material seiner Verformung entgegensetzt. Ein Bauteil aus einem Material mit hohem Elastizitätsmodul (z. B. Stahl) ist also steif, ein Bauteil aus einem Material mit niedrigem Elastizitätsmodul (z. B. Gummi) ist nachgiebig. Der Elastizitätsmodul hat die Einheit einer mechanischen Spannung.“ (<http://de.wikipedia.org/wiki/Elastizit%C3%A4tsmodul>)

Exfoliation: Ton-NP-Plättchen werden im Polymer auseinandergezogen um z.B. einen Barriere-Effekt (Hitzebeständigkeit) zu erreichen

Funktionalisierung: Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der NP können zielgerichtet verändert werden indem zum Beispiel durch kovalente Bindung von funktionellen Molekülgruppen auf der Oberfläche der NP, oder durch die Beschichtung der NP mit Polymeren etc.

Interkalation: Ton-NP-Plättchen werden durch Einlagerung von Polymer zwischen die Plättchen auseinandergeschoben.

Kristallit [griechisch] der, einzelnes Kristallkorn eines Kristallaggregats, das durch die Nachbarkörner am Wachsen gehindert wird. Ein aus vielen Kristalliten aufgebauter Festkörper wird polykristallin genannt. <http://lexikon.meyers.de/wissen/Kristallit>

Komposite: Verbundwerkstoffe

µm: Abkürzung für Mikrometer

Masterbatch: Unter dem Begriff Masterbatch versteht man Kunststoffadditive in Form von Granulaten mit Gehalten an Farbstoffen und/oder Additiven, die höher sind als in der Endanwendung. Sie werden dem natürlichen Kunststoff (Rohpolymer) zum Einfärben oder zur Veränderung der Eigenschaften beigemischt. Masterbatches erhöhen dabei im Vergleich zu Pasten, Pulver oder flüssigen Zusatzstoffen die Prozesssicherheit und sind sehr gut zu verarbeiten. Bei einem Masterbatch wird meist versucht das Additiv soweit wie möglich zu konzentrieren, d.h. so wenig Polymer wie möglich zu nehmen, um das Additiv "zusammenzukleben". (<http://de.wikipedia.org/wiki/Masterbatch>)

Nanopartikel-Komposit: Matrix, die Nanopartikel enthält. In diesem Bericht sind mit dieser Bezeichnung immer Polymer-Komposite gemeint, obwohl es auch keramische oder metallische Komposite gibt. Keramische oder metallische Komposite sind jedoch für Textilien von geringer Bedeutung (Ausnahme: technische Textilien)

Nano-Textilien: Diese Textilien erfüllen eine Funktion, die auf Effekten der Nanoskaligkeit beruht. In diesem Bericht haben wir unterschieden in Nano-Textilien, die synthetische NP enthalten und Nano-Textilien, die keine synthetischen NP enthalten, dafür aber nanoskalige Strukturen aufweisen.

Nanoskalig: eine oder zwei oder drei Dimensionen im Nanometerbereich

Nicht-Nano-Textilien: Diese Textilien enthalten keine synthetische NP und auch keine nanoskalige Strukturen.

Nm: Abkürzung für Nanometer

NP: synthetische Nanopartikel

Textilmaterial: Faser- und Beschichtungsmaterial

Xero-Gel-Beschichtung: Durch einen Sol-Gel-Prozess entstehende Beschichtung