

Sabine Greßler,
Florian Part,
André Gzásó*,
Marion Huber-Humer

Zusammenfassung

Nanomaterialien können die Eigenschaften von Lebensmittelkontaktmaterialien verbessern. Insbesondere für Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff sind derartige Innovationen von großem Interesse. Sie zielen darauf ab, die Lagerungsfähigkeit von Lebensmitteln zu erhöhen und damit die Frische sowie Qualität zu gewährleisten. Auch die technischen Eigenschaften, wie Härte, Abriebbeständigkeit oder Verarbeitbarkeit von Materialien sollen verbessert werden. Lebensmittelkontaktmaterialien unterliegen zum Schutz der VerbraucherInnen in der EU einer Reihe von Vorschriften. Nanomaterialien müssen zugelassen werden und werden von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) einer Sicherheitsbewertung unterzogen. Bei den in der EU zugelassenen Nanomaterialien werden Spezifikationen und Beschränkungen für eine Verwendung festgelegt, um eine Exposition der VerbraucherInnen zu verhindern oder so gering wie möglich zu halten und damit ein gesundheitliches Risiko auszuschließen. In Recycling- bzw. Abfallbehandlungsanlagen kann es zu erhöhter Ultra- bzw. Feinstaubbelastung von ArbeitnehmerInnen kommen, wodurch auch unbeabsichtigt Nanomaterialien freigesetzt werden können. Bislang gibt es jedoch keine verlässlichen Nachweise, dass das Recycling von Nanomaterialhaltigen Polymeren zu einer erhöhten Exposition von ArbeitnehmerInnen führt. Hinsichtlich der Umweltschutzaspekte ist bis dato wenig über das spezifische Verhalten von Nanomaterialien und -kompositen während Abfallbehandlungsprozessen bekannt. Auch wären umfassende Untersuchungen zur Rezyklierbarkeit von Nanokompositen im Sinne einer nachhaltigen Nanotechnologie notwendig.

* Korrespondenzautor

Nanotechnologische Anwendungen für Lebensmittelkontaktmaterialien

Einleitung

Der Begriff „Lebensmittelkontaktmaterialien“ (LMKM) umfasst eine Vielzahl von Materialien und Gegenständen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen können. Zu den Gegenständen gehören etwa Geschirr, Besteck, Kochtöpfe, Bratpfannen, Trinkgläser, die Knoblauchpresse oder der Pfannenwender und die Kaffeemaschine. Aber auch alle Verpackungsmaterialien, sowie Aufbewahrungsbehälter und Verarbeitungsmaschinen aus der Lebensmittelindustrie gehören diesem umfangreichen und wesentlichen Bereich der Gebrauchsgegenstände im Lebensmittelrecht an¹. Keine Lebensmittelkontaktmaterialien sind per Gesetz ortsfeste öffentliche und private Wasserversorgungsanlagen, Antiquitäten sowie Überzugsmaterialien, die mit dem Lebensmittel ein Ganzes bilden und mit diesem verzehrt werden.² Gegenstände für den Lebensmittelkontakt können aus verschiedenen Materialien hergestellt werden, etwa aus Metall, Keramik, Glas oder Kunststoff.

Nanomaterialien können die Eigenschaften von Lebensmittelkontaktmaterialien verbessern. Insbesondere im Bereich der Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff sind derartige Innovationen von großem Interesse, um die Lagerungsfähigkeit von Lebensmitteln zu erhöhen und damit die Frische sowie Qualität zu gewährleisten und auch um die technischen Eigenschaften, wie Härte, Abriebbeständigkeit oder Verarbeitbarkeit von Materialien zu verbessern.

Im *NanoTrust Dossier Nr. 4* vom Mai 2008 wurde ein erster kurzer Überblick über die nanotechnologischen Anwendungen im Bereich der Lebensmittelverpackungen gegeben. In diesem Dossier wird diese Thematik ausführlicher behandelt und insbesondere jene Nanomaterialien näher vorgestellt, die für eine Verwendung in Lebensmittelkontaktmaterialien aus Kunststoffen in der EU bereits zugelassen sind. Ebenso werden die rechtlichen Rahmenbedingungen, Umwelt- und Gesundheitsrisiken sowie die Themen Entsorgung und Recycling näher betrachtet.

Rechtliche Rahmenbedingungen in der EU

Lebensmittelkontaktmaterialien (LMKM) unterliegen zum Schutz der VerbraucherInnen einer Reihe von Vorschriften. Als Rahmen dient dabei die Verordnung (EG) Nr. 1935/2004, die auf dem Grundsatz beruht, dass Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln unmittelbar oder mittelbar in Berührung zu kommen, ausreichend inert sind. Damit soll ausgeschlossen werden, dass Stoffe in Mengen, die genügen, um die menschliche Gesundheit zu gefährden in Lebensmittel übergehen. Auch eine unvermeidbare Veränderung der Zusammensetzung von Lebensmitteln und eine Beeinträchtigung von Geruch, Geschmack, Farbe oder Aussehen durch ein Lebensmittelkontaktmaterial sind nicht erlaubt.¹

Die Rahmenverordnung gilt auch für sogenannte „aktive“ und „intelligente“ LMKM. „Aktive LMKM“ sind dazu bestimmt, die Haltbarkeit eines verpackten Lebensmittels zu verlängern oder dessen Zustand zu erhalten oder zu verbessern. Sie enthalten Bestandteile, die Stoffe an das verpackte Lebensmittel oder die das Lebensmittel umgebende Umwelt abgeben oder diesen entziehen können. Unter „intelligenten LMKM“ werden Materialien und Gegenstände verstanden, mit denen der Zustand eines verpackten Lebensmittels oder die das Lebensmittel umgebende Umwelt überwacht wird. Dazu gehören zum Beispiel Sensoren, die etwa die Temperatur eines Lebensmittels überwachen und anzeigen. Derzeit läuft international eine Reihe von Forschungsprojekten zur Entwicklung solcher „intelligenten“ Verpackungsmaterialien, die in Zukunft eingesetzt werden sollen.³ Über die Rahmenverordnung hinaus enthält die Durchführungsverordnung (EG) Nr. 450/2009⁴ spezielle Anforderungen an die Vermarktung „aktiver“ und „intelligenter“ LMKM. So müssen diese einer Sicherheitsbewertung und einem Zulassungsverfahren unterzogen werden. Diese Verordnung weist auch explizit darauf

hin, dass das Risiko von Nanopartikeln auf Einzelfallbasis bewertet werden sollte, da diese wesentlich andere chemische und physikalische Eigenschaften haben als Stoffe mit größerer Struktur. Derzeit ist in der EU noch kein Nanomaterial für „aktive“ oder „intelligente“ LMKM zugelassen.

Eine weitere Gruppe von Materialien und Gegenständen, für die in der EU mittels Durchführungsverordnung (EU) Nr. 10/2011⁵ Anforderungen erlassen wurden und bei der bereits Nanomaterialien eingesetzt werden, ist jene der **Kunststoffe**. Bei der Herstellung von Kunststoffschichten in Materialien und Gegenständen aus Kunststoff dürfen nur die in der sogenannten „Unionsliste“ im Anhang I der Verordnung angeführten Stoffe

absichtlich verwendet werden. Stoffe mit Nanostruktur dürfen nur verwendet werden, wenn sie ausdrücklich zugelassen und in der „Unionsliste“ angeführt sind. Die Sicherheitsbewertung vor Zulassung wird von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) durchgeführt. Eine Definition, was genau unter „Stoffen mit Nanostruktur“ zu verstehen sei, enthält die Verordnung nicht. Allerdings enthält die „Novel Food“-Verordnung⁶ eine Definition, die für die gesamte Lebensmittel-Gesetzgebung in der EU gilt. Mit Stand vom Mai 2017 sind in der „Unionsliste“ elf Stoffe angeführt, die der Definition eines „technisch hergestellten Nanomaterials“ gemäß „Novel Food“-Verordnung entsprechen (Tabelle 1).

Nanomaterialien für LMKM aus Kunststoff

Werden Lebensmittel nicht sofort nach deren Herstellung konsumiert, sind Verpackungen unerlässlich. Sie sollen vor allem Schutz vor Verschmutzungen, Sauerstoff, Licht/UV-Strahlung, Mikroorganismen und Feuchtigkeit bieten und dabei aber sicher in ihrer Anwendung sowie günstig in der Produktion sein. Zusätzlich sollen sie leicht, widerstandsfähig bei Verarbeitung, Befüllung, Lagerung und Transport und unproblematisch bei der Entsorgung oder stofflichen Verwertung sein. Vor allem erfüllen viele Kunststoffe, sogenannte Polymere, all die erstgenannten Produktanforderungen. Am häufigsten werden für LMKM Polyolefine, wie etwa Polypropylen (PP) oder verschiedene Polyethylen-Typen sowie Po-

Tabelle 1: Zugelassene Nanomaterialien in LMKM aus Kunststoff gemäß „Unionsliste“ (EU-VO Nr. 10/2011, Anhang I, Stand Mai 2017)⁵

FCM-Nr.	Bezeichnung des Stoffs	Beschränkungen und Spezifikationen
87	Siliciumdioxid, silyliert	Bei synthetischem amorphem Siliciumdioxid, silyliert: Primärpartikel von 1–100 nm, die zu 0,1–1 µm aggregiert sind und Agglomerate von 0,3 µm bis Millimetergröße bilden können.
410	Kaolin	Partikel sind nur in einer Stärke von weniger als 100 nm zulässig, wenn sie mit einem Anteil bis zu 12 % w/w in die aus Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH) bestehende innere Schicht einer mehrschichtigen Struktur eingearbeitet sind, wobei die Schicht in direktem Kontakt mit dem Lebensmittel als funktionelle Barriere die Migration von Partikeln in das Lebensmittel verhindert.
411	Ruß („Carbon black“)	Primärpartikel von 10–300 nm, aggregiert zu 100–1200 nm, die Agglomerate von 300 nm–mm bilden können. Toluol-lösliche Substanzen: maximal 0,1 %, bestimmt nach ISO- Methode 6209. UV-Absorption des Cyclohexanextrakts bei 386 nm: < 0,02 AU für eine Zelle von 1 cm oder < 0,1 AU für eine Zelle von 5 cm, bestimmt mit einer allgemein anerkannten Analyseverfahren: max. 0,25 mg/kg Ruß. Höchstwert für die Verwendung von Ruß im Polymer: 2,5 Gew.-%.
807	Titannitrid, Nanopartikel	Keine Migration von Titannitrid-Nanopartikeln. Nur zur Verwendung in Polyethylenterephthalat (PET) bis zu 20 mg/kg. Im PET haben die Agglomerate einen Durchmesser von 100–500 nm, bestehend aus primären Titannitrid-Nanopartikeln; die Primärpartikel haben einen Durchmesser von etwa 20 nm.
859	Copolymer von Butadien, Ethylacrylat, Methylmethacrylat und Styrol, vernetzt mit Divinylbenzol, in Nanoform	Nur zur Verwendung als Partikel mit einem Gewichtsanteil von nicht mehr als 10 % w/w in nicht weichgemachtem PVC in Kontakt mit allen Lebensmittellarten nicht über Raumtemperatur, auch bei langfristiger Aufbewahrung. Bei Verwendung mit dem Stoff mit der FCM-Stoff-Nr. 998 und/oder dem Stoff mit der FCM-Stoff-Nr. 1043 gilt die Beschränkung von 10 Gew.-% für die Summe dieser Stoffe. Der Partikeldurchmesser muss größer als 20 nm und bei mindestens 95 % (nach Anzahl) größer als 40 nm sein.
998	Copolymer von Butadien, Ethylacrylat, Methylmethacrylat und Styrol, nicht vernetzt, in Nanoform	Nur zur Verwendung als Partikel mit einem Gewichtsanteil von nicht mehr als 10 % w/w in nicht weichgemachtem PVC in Kontakt mit allen Lebensmittellarten nicht über Raumtemperatur, auch bei langfristiger Aufbewahrung. Bei Verwendung mit dem Stoff mit der FCM-Stoff-Nr. 859 und/oder dem Stoff mit der FCM-Stoff-Nr. 1043 gilt die Beschränkung von 10 Gew.-% für die Summe dieser Stoffe. Der Partikeldurchmesser muss größer als 20 nm und bei mindestens 95 % (nach Anzahl) größer als 40 nm sein.
1016	[Methacrylsäure, Ethylacrylat, N-Butylacrylat, Methylmethacrylat und Butadien]-Copolymer in Nanoform	Nur zur Verwendung a) mit einem Massenanteil von bis zu 10 % in weichmacherfreiem PVC; b) mit einem Massenanteil von bis zu 15 % in weichmacherfreien Polyactiden (PLA). Das fertige Material ist bei höchstens Raumtemperatur zu verwenden.
1030	Montmorillonitlehm, modifiziert durch Dimethyldialky[(C16-C18)-ammoniumchlorid	Nur zur Verwendung mit einem Massenanteil von bis zu 12 % in Polyolefinen in Kontakt mit trockenen Lebensmitteln, denen in Tabelle 2 des Anhangs III das Simulanz E zugeordnet ist, und bei höchstens Raumtemperatur. Die Summe der spezifischen Migration von 1-Chlorhexadecan und 1-Chloroctadecan darf 0,05 mg/kg Lebensmittel nicht überschreiten. Kann Plättchen in Nanoform enthalten, die nur in einer Dimension dünner als 100 nm sind. Solche Plättchen müssen parallel zur Polymeroberfläche ausgerichtet und vollständig in das Polymer integriert sein.
1043	Copolymer von Butadien, Ethylacrylat, Methylmethacrylat und Styrol, vernetzt mit 1,3-Butandioldimethacrylat, in Nanoform	Nur zur Verwendung als Partikel mit einem Gewichtsanteil von nicht mehr als 10 % w/w in nicht weichgemachtem PVC in Kontakt mit allen Lebensmittellarten nicht über Raumtemperatur, auch bei langfristiger Aufbewahrung. Bei Verwendung mit dem Stoff mit der FCM-Stoff-Nr. 859 und/oder dem Stoff mit der FCM-Stoff-Nr. 998 gilt die Beschränkung von 10 Gew.-% für die Summe dieser Stoffe. Der Partikeldurchmesser muss größer als 20 nm und bei mindestens 95 % (nach Anzahl) größer als 40 nm sein.
1046	Zinkoxid, Nanopartikel, beschichtet mit [3-(Methacryloxy)propyl]trimethoxysilan [FCM-Stoff-Nr. 788]	Nur zur Verwendung in weichmacherfreien Polymeren. Die Beschränkungen und Spezifikationen für den Stoff mit der FCM-Stoff-Nr. 788 sind einzuhalten (Nur zur Verwendung als Oberflächenbehandlungsmittel bei anorganischen Füllstoffen).
1050	Zinkoxid, Nanopartikel, unbeschichtet	Nur zur Verwendung in weichmacherfreien Polymeren.

lythylenterephthalat (PET), Polystyrol (PS) und Polyvinylchlorid (PVC) eingesetzt.⁷ Allerdings haben Kunststoffe auch Schwächen, wie die Durchlässigkeit gegenüber Gasen, schlechte Widerstandsfähigkeit gegenüber hohen Temperaturen oder mechanischer Beanspruchung. Deshalb werden den Polymeren zusätzlich Stoffe, sogenannte Additive und Füller, zugesetzt, um deren Eigenschaften verbessern zu können. Hierbei spielen Nanomaterialien (als funktionelle Füllstoffe) eine zunehmend bedeutendere Rolle. So erhöht beispielsweise Nanotitannitrid die thermischen und mechanischen Eigenschaften von PET-Flaschen.⁸ Wie oben angeführt sind in der EU (mit Stand Mai 2017) elf Nanomaterialien für eine Verwendung in LMKM aus Kunststoff bereits zugelassen (Tabelle 1), die unterschiedliche Funktionen erfüllen und für die zum Schutz der VerbraucherInnen genaue Spezifikationen vorgegeben werden.

Siliziumdioxid [SiO₂], silyliert

SiO₂, silyliert, ist seit 1999 in der EU ohne Beschränkung als Additiv für alle Arten von Kunststoffen zugelassen. Verwendet wird es etwa um die mechanischen Eigenschaften, wie Steifheit oder Zugfestigkeit des Polymers zu verbessern sowie um die Durchlässigkeit für Sauerstoff zu verringern. Auch für Barrierschichten, die auf Folien aufgedampft werden, wird SiO₂ eingesetzt. Solche Mehrschichtfolien werden seit mehreren Jahren für Lebensmittelverpackungen, z. B. für Kartoffelchips oder Käse, verwendet.⁹

Eine Neubewertung erfolgte 2014 durch die EFSA¹⁰ auf der Grundlage, dass diese Substanz schon immer aus synthetischem amorphem Siliziumdioxid in Nanoform hergestellt wird. Die Oberflächenmodifikation kann mittels Dichlordimethylsilan oder einem anderen Silan erfolgen, um eine Verarbeitbarkeit mit dem Polymer zu gewährleisten.¹¹ Die Primärpartikelgröße liegt unter 100 nm, im pulverförmigen Handelsprodukt liegen jedoch größere Aggregate und Agglomerate vor. Eine Migration von SiO₂-Partikeln, gleich welcher Größe, die in eine Polyethylenfolie zu Testzwecken eingearbeitet wurden, konnte nicht festgestellt werden.¹⁰ Die EFSA sieht deshalb keine Sicherheitsbedenken für KonsumentInnen.

Kaolin

Kaolin, auch Porzellanerde genannt, ist ein weißes Gestein, das als Hauptbestandteil Kaolinit, ein Verwitterungsprodukt des Feldspats enthält.¹² Kaolin wird mit Polyacrylsäure und Natriumsalz oberflächenbehandelt, um eine gleichmäßigere Verteilung zu ermöglichen. Diese Kaolin-Plättchen können dann eine Stärke von unter 100 nm aufweisen und werden in einer Konzentration von bis zu 12 % in eine innere Schicht aus Ethylenvinylalkohol-Copolymer (EVOH) einer mehrschich-

tigen Struktur eingearbeitet. Diese Schicht fungiert als Gasbarriere bei LMKM für Getränke, Saucen, Dressings, Würste sowie Tiernahrung. Die Substanz wurde 2014 von der EFSA evaluiert¹³. Dabei konnte keine Migration einzelner Plättchen in Lebensmittelsimulanzien festgestellt werden. Aus Kaolin – welches sich aus verschiedenen metallhaltigen Tonmineralien zusammensetzt – können jedoch Aluminium- und Magnesiumionen freigesetzt werden. Die innere Schicht mit Kaolin-haltigem EVOH muss deshalb noch durch eine zusätzliche funktionelle Barriere abgeschirmt werden, um eine Migration dieser Ionen in Lebensmittel oder Getränke zu verhindern.

Ruß („Carbon black“)

Industrieruß, auf Englisch „Carbon black“ genannt, besteht aus nanoskaligen Kohlenstoffpartikeln, die aber zu größeren Aggregaten und Agglomeraten verschmelzen. Die Substanz wird pulverförmig gehandelt und seit Jahrzehnten für die verschiedensten Anwendungen eingesetzt, etwa für Autoreifen, Kosmetika und als schwarzes Pigment sowie als UV-Schutz für LMKM aus Kunststoff. Eine von der EFSA 2005 durchgeführte Evaluierung von „Carbon black“ ergab, dass die Substanz zwar nicht selbst vom Kunststoff in Lebensmittel übergeht, dass aber Verunreinigungen mit aromatischen Kohlenwasserstoffen durchaus etwa in Speiseöle übergehen können. Deshalb wurden Spezifikationen (Beschränkung der Toluol-löslichen Substanzen und der UV-Absorption des Cyclohexan-Extrakts) festgelegt, um eine derartige Migration zu limitieren.¹⁴

Titannitrid-Nanopartikel

Titannitrid-Nanopartikel werden als Additiv für LMKM aus PET (z. B. Flaschen) eingesetzt, um die thermischen Eigenschaften des Kunststoffs zu verbessern.¹⁵ Die Substanz wurde 2008 für einen Einsatz in PET-Flaschen von der EFSA evaluiert. Ein Antrag auf Erweiterung des Einsatzgebietes auch auf Folien aus PET wurde 2012 überprüft.¹⁶ Die Primärpartikelgröße von Titannitrid-Nanopartikeln beträgt etwa 20 nm. Bei einer Einarbeitung in PET bilden sich Agglomerate mit einem Durchmesser von etwa 100-500 nm. Titannitrid ist chemisch inert und völlig unlöslich in allen getesteten Lebensmittelsimulanzien. Die EFSA konnte in Testreihen keine Migration von Titan feststellen. Die Behörde sieht deshalb keine Sicherheitsbedenken, wenn die Substanz in einer Menge von bis zu 20 mg/kg PET-Kunststoff eingesetzt wird.

Copolymere in Nanoform

Copolymere von Butadien, Ethylacrylat, Methylmethacrylat und Styrol dürfen in der EU in einer Konzentration von bis zu 10 Gewichtsprozent als Additiv (Schlagzähmodifizierer)¹⁷ in festem PVC

eingesetzt werden. Copolymere setzen sich aus verschiedenartigen Monomereinheiten zusammen, wobei gemäß Verordnung (EU) 10/2011 nur bestimmte Monomere für LMKM aus PVC eingesetzt werden dürfen. Da diese Monomere fest in die Polymermatrix eingebunden werden und keine reaktiven funktionellen chemischen Gruppen aufweisen, ist keine oder nur eine sehr geringe Migration von Nanopartikeln aus dem LMKM in Lebensmitteln zu erwarten. Die EFSA hat daher in ihrer Evaluierung aus 2014 keine Sicherheitsbedenken für die KonsumentInnen.¹⁸

Montmorillonitlehm (Nanoton)

Nanoskaliges Montmorillonit ist ein Natrium-Aluminium-Silikat und wird auch „Nanoton“ genannt (engl. „nanoclay“), da diese Schichtsilikate mindestens eine Dimension im Nanometermaßstab aufweisen. Die Dicke der Plättchen beträgt nur 1 bis einige wenige Nanometer, die Länge mehrere Hundert bis Tausende Nanometer. Montmorillonit ist ein wesentlicher Bestandteil von Bentonit (60-80 %). Laut Literaturangaben ist „Nanoton“ mit ca. 70 % Marktanteil das international derzeit am häufigsten kommerziell genutzte Nanomaterial.¹⁹ So können bereits geringe Mengen an „Nanoton“ (zwischen 1 und 5 Gewichtsprozent) die Gasbarriereigenschaften von LMKM verbessern, da Gase und Aromastoffe (d. h. Kohlensäure, Lebensmittelaromen etc.) einen gewundenen und deshalb längeren Weg zwischen den parallel zur Oberfläche der Kunststoffmatrix angeordneten Plättchen zurücklegen müssen.²⁰ Durch diese Gasbarriere kann so zum Beispiel die Haltbarkeit und Aromastabilität von Lebensmitteln erhöht werden. Um Schichtsilikate, wie Montmorillonit, in eine Kunststoffmatrix gleichmäßig einarbeiten zu können, müssen die Plättchen jedoch zuvor voneinander getrennt und oberflächenmodifiziert werden, da sie ansonsten während ihrer Verarbeitung sofort verklumpen würden. Diese Oberflächenmodifizierung geschieht zumeist mit quartären Ammoniumverbindungen, welche die hydrophile Silikatoberfläche in eine hydrophobe (organophile) Oberfläche umwandeln. International wird „Nanoton“ in Mehrschicht-Verpackungen etwa für Flaschen für kohlenensäurehaltige Getränke (Bier, Limonaden) oder thermogeformte Kunststoffbehälter eingesetzt.²⁰ Montmorillonit ist seit Mai 2017 in der EU zugelassen.

Montmorillonit wurde 2015 von der EFSA evaluiert.²¹ Untersuchungen mittels Transmissionselektronenmikroskop (TEM) zeigten teilweise vereinzelte Plättchen des Tons. Allerdings sei eine Migration von Plättchen, die in einer Dimension im Nanometermaßstab vorliegen, nicht zu erwarten, da die Länge und Breite der Plättchen in der Größenordnung von einigen Hundert Nanometern vorliegen, diese parallel zur Oberfläche der Sperrschicht vorliegen und komplett in die Polymermatrix eingebettet sind. Die Migrati-

on von Aluminium in 95 %-igen Ethanol bei 40 °C über 10 Tage wurde ebenfalls untersucht. Die Konzentration war jedoch gegenüber der Kontrollprobe nicht signifikant erhöht. Ebenso konnte keine Migration der Ammoniumverbindung in das Lebensmittel-Testmedium festgestellt werden. Zusammenfassend sieht die EFSA keinen Anlass für Sicherheitsbedenken für Konsumenten gegenüber der Substanz, wenn diese bis zu 12 Gewichtsprozent in Polyolefinen für die Langzeitlagerung von trockenen Lebensmitteln bei Raum- oder Gefriertemperaturen verwendet wird.

Zinkoxid-Nanopartikel

Zinkoxid in nanopartikulärer Form ist sowohl unbeschichtet, als auch zur besseren Dispergierbarkeit oberflächenmodifiziert mit einem Silan, für eine Verwendung als Lichtschutzadditiv seit 2016 in der EU in weichmacherfreien Polymeren zugelassen. Die Substanz wird in Pulverform verwendet. Im endgültigen Polymer lassen sich Nanopartikel nachweisen, allerdings liegen diese zumeist in aggregierter Form vor. Migrationsuntersuchungen durch die EFSA zeigten, dass zwar keine Nanopartikel aus dem LMKM in die Testlösungen freigesetzt wurden, jedoch Zinkionen.²² Solche Freisetzungstests deuten somit daraufhin, dass sich aufgrund von Umwelteinwirkungen eher Zinkionen aus dem Nanozinkoxid-Polymer-Verbund herauslösen als ganze Nanopartikel. Die vom „Wissenschaftlichen Lebensmittelausschuss“ (Scientific Committee on Food) der EU empfohlene tolerierbare Höchstaufnahmemenge (UL-Wert) von 25 mg/Person und Tag²³ wird dabei allerdings nicht erreicht. In Kombination mit der Aufnahme von Zinkionen durch die Ernährung, könnte dieser Wert aber durchaus überschritten werden.

Sonstige, nicht in der EU zugelassene Nanomaterialien

In der Literatur werden noch weitere Nanomaterialien angeführt, die in LMKM Verwendung finden, die allerdings in der EU (noch) nicht zugelassen sind.²⁴ Dazu gehört etwa **Titandioxid** (TiO₂), das als Lichtschutzadditiv oder aufgrund seiner antimikrobiellen Wirkung in Polymere eingearbeitet werden kann. Auch Nanopartikel von **Kalziumcarbonat** (CaCO₃), welche die Festigkeit oder die Hitzebeständigkeit von Kunststoff verbessern können, werden als Zusatz zu LMKM diskutiert. Am internationalen Markt (z. B. USA, Asien) finden sich auch LMKM mit **Nanosilber**²⁵ (z. B. Frischhaltebehälter, Schneidbretter), das aufgrund seiner antimikrobiellen Wirkung die Haltbarkeit von Lebensmitteln erhöhen soll.

Gesundheitlicher Verbraucherschutz

Ein gesundheitliches Risiko durch Nanomaterialien in LMKM für VerbraucherInnen kann nur dann gegeben sein, wenn auch eine Exposition möglich ist, d. h. wenn das Nanomaterial in ein Lebensmittel oder Getränk z. B. aus einer Verpackung übertritt. Alle in der EU zugelassenen Nanomaterialien für eine Verwendung in LMKM werden deshalb einer Sicherheitsüberprüfung unterzogen, bei der mittels standardisierter Testmethoden untersucht wird, ob ein Übertritt möglich ist. Dabei werden verschiedene Lebensmittel-simulanzien, etwa Alkohol oder Säuren verwendet, um ihr Freisetzungsverhalten festzustellen. Die in der EU festgelegten und standardisierten Testmethoden sind allerdings nicht für Nanomaterialien validiert. Der analytische Nachweis von Nanopartikeln in Lebensmitteln ist sehr aufwendig, da die quantitative Unterscheidung zwischen freigesetzten Nanopartikeln und ihrer ionischen Zerfallsprodukte eine große Herausforderung darstellt. Solche Schwierigkeiten führen zu gewissen Unsicherheiten und erschweren somit die Interpretation von Migrationsuntersuchungen mit Nanomaterialien. Oftmals sind die in wissenschaftlichen Studien verwendeten Methoden nur mangelhaft beschrieben.²⁶

Bei den in der EU zugelassenen Nanomaterialien werden Spezifikationen und Beschränkungen für eine Verwendung festgelegt, um eine Exposition der VerbraucherInnen zu verhindern oder so gering wie möglich zu halten (siehe Tabelle 1). So etwa muss eine Kunststoffschicht mit eingearbeitetem Kaolin zusätzlich mit einer Sperrschicht vor einem direkten Kontakt mit einem Lebensmittel geschützt sein. Generell wurde bei den in der EU zugelassenen Nanomaterialien für den Lebensmittelkontakt sowohl von der EFSA als auch in anderen Untersuchungen²⁵ keine oder eine hinsichtlich eines gesundheitlichen Risikos vernachlässigbare Migration von Nanopartikeln in Lebensmittelsimulanzien festgestellt. Wie bereits erwähnt, können jedoch von manchen Nanomaterialien, wie etwa Zinkoxid, „Nanoton“ oder auch Nanosilber, Ionen freigesetzt werden und somit in ein Lebensmittel übertreten. Im Sinne der Risikobewertung solcher Nanokomposite ist es daher sehr wichtig, dass solche Prozesse mitberücksichtigt werden. Hierbei ist auch noch zu erwähnen, dass die Migrationswerte für herausgelöste Ionen sehr Nanomaterial-spezifisch sind und je nach tatsächlichem Einsatzgebiet stark variieren können. Grundsätzlich gilt, dass die festgelegten oder empfohlenen Grenzwerte für eine Aufnahme etwa durch die Nahrung nicht überschritten werden dürfen. In saurem Milieu ist zum Beispiel eine Freisetzung von Aluminiumionen aus „Nanoton“ möglich. Untersuchungen mit im Handel erhältlichen Kunststoffbeuteln

für Lebensmittel zeigen, dass sowohl Aluminiumionen als auch Aluminium-Nanopartikel freigesetzt werden können. Allerdings war die Menge sehr gering und lag in der Untersuchung unter dem von der EFSA festgelegten TWA-Wert („Tolerable weekly intake“) von 1 mg Aluminium pro Kilogramm Körpergewicht.²⁷

Hinsichtlich eines gesundheitlichen Risikos sind ebenso die chemischen Substanzen, die zur Oberflächenbehandlung von Nanopartikeln eingesetzt werden, von Relevanz. Soll etwa ein „Nanoton“ in eine polymere Matrix eingearbeitet werden, so ist – mit Ausnahme von Polyvinylalkohol – immer eine quartäre Ammoniumverbindung (QAV) als „Vermittler“ notwendig, da das Einarbeiten des hydrophilen Tons in den hydrophoben Kunststoff sonst eher ungenügend gelingt. Nanoton und QAV als organischer Modifikator bilden eine Einheit, die ohne spezielle chemische Prozesse nicht mehr zu trennen ist. Allerdings zeigen Untersuchungen, dass unter bestimmten Bedingungen die Verbindung zwischen Kunststoff, nanoskaligem Zuschlagstoff und QAV wieder aufgebrochen werden kann.²⁸ Da QAV lipophile bzw. fettliebende Eigenschaften aufweisen, ist eine Migration aus Lebensmittelverpackungen insbesondere dann wahrscheinlich, wenn darin fettthaltige Lebensmittel verpackt werden. Auch säurehaltige Lebensmittel können ungeeignete Kunststoffe angreifen (z. B. Polyamid) und eine Migration von QAV in das Lebensmittel ermöglichen. Um eine mögliche Freisetzung abschätzen zu können, ist demnach eine genaue Kenntnis über das zu verpackende Lebensmittel nötig, insbesondere sind Angaben zur Polarität und Lipophilie des Lebensmittels unerlässlich. Eine Möglichkeit, um die Freisetzung von QAV im Sinne eines vorbeugenden gesundheitlichen Verbraucherschutzes zu minimieren, ist, die dotierte Kunststoffschicht nicht in direkten Kontakt mit dem Lebensmittel zu bringen. Das Beispiel einer mit QAV oberflächenmodifizierten Nanomaterials zeigt, dass die Toxizität potenziell nicht nur vom Partikel selbst, sondern auch von seiner Oberflächenbeschichtung abhängt. Eine umfassende Literaturstudie zu Umweltbelastungen durch QAV hebt zudem hervor, dass diese eine hohe Toxizität für aquatische Organismen aufweisen und biologisch schwer abbaubar sind.²⁹ Weggeworfene Plastikverpackungen unterliegen der Verwitterung, wodurch QAV aus der Polymermatrix freigesetzt werden und in Gewässer gelangen können.

Bei den für LMKM in der EU zugelassenen Nanomaterialien erstreckt sich die Sicherheitsüberprüfung auch auf die Substanzen zur Oberflächenmodifikation der Nanomaterialien. Es dürfen nur solche eingesetzt werden, die auch zugelassen sind, und/oder es werden, wie etwa im Fall von Montmorillonit, eigene Migrationsgrenzwerte für diese Substanzen festgelegt (siehe Tabelle 1).

Sicherheit in der Entsorgungsphase

Während über die potenziellen Gesundheitsauswirkungen in der Nutzungsphase von Nanomaterial-haltigen Polymeren (Nanokompositen) bereits vieles bekannt ist, so sind die möglichen Umweltauswirkungen in der Entsorgungsphase bisher nur lückenhaft untersucht worden. Ebenso beziehen sich die EU-Bestimmungen nur auf gesundheitliche Risiken während der Nutzungsphase. Risiken für Umwelt und Gesundheit während der Entsorgungsphase sind nicht zulassungsrelevant. In einer Literaturstudie der „Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung“ (OECD) wird beispielsweise darauf hingewiesen, dass nanoskalige Additive in PET-Flaschen durch Recycling- bzw. Regranulierungsprozesse wieder freigesetzt werden können.³⁰

In Recycling- bzw. Abfallbehandlungsanlagen kann es zu einer erhöhten Ultra- bzw. Feinstaubbelastung kommen, wobei auch durch mechanische oder chemische Einwirkungen unbeabsichtigt Nanomaterialien freigesetzt werden.³¹ Bis dato gibt es jedoch keine verlässlichen Nachweise, dass das Recycling von Nanomaterial-haltigen Polymeren zu einer erhöhten Exposition von ArbeitnehmerInnen führt. Um eine erhöhte Belastung am Arbeitsplatz ausschließen zu können, wäre eine größere Anzahl an Studien bzw. an Expositionsmessungen am Arbeitsplatz nötig.

Erste Untersuchungen im Labormaßstab, wie z. B. Studien mit CNT-haltigen Polymeren, haben gezeigt, dass es durch Mahl- oder Zerkleinerungsprozesse zu keiner erhöhten Exposition mit CNT-Einzelfasern kommt.³² Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch eine andere Studie über CNT-haltige Epoxidharz- und Polycarbonat-Verbundstoffe.³³ Diese Studie zeigte auch, dass sich

die freigesetzten Staubmengen aus größeren Agglomeraten in unterschiedlicher Form zusammensetzen, aber nie aus einzelnen freigesetzten Nanopartikeln. Hingegen hat eine Untersuchung mit simulierten Schleifprozessen ergeben, dass mittels Elektronenmikroskopie ein nicht zu vernachlässigender Anteil an einzelnen CNTs sowie CNT-Agglomeraten im Abrieb von Polymerkompositen festgestellt werden konnte.³⁴ In den Studien war man sich dennoch einig, dass eine potenzielle Freisetzung sehr stark von der tatsächlichen Anwendung, der Trägermatrix selbst und von den einwirkenden Prozessen, wie z. B. schleifen, zerkleinern, vermahlen etc., abhängt. In anderen Untersuchungen, in welchen Alterungsprozesse von Nanokompositen simuliert wurden, wurde bereits versucht, Testprotokolle zu standardisieren, um die Vergleichbarkeit sowie Aussagekraft solcher Studien zu erhöhen.^{35, 36} Für eine allgemeingültige Aussage im Bereich der LMKM wären dennoch deutlich mehr Studien notwendig.

Hinsichtlich der Umweltschutzaspekte ist bis dato ebenso wenig über das spezifische Verhalten von Nanomaterialien und -kompositen während Abfallbehandlungsprozessen bekannt (siehe [NanoTrust Dossier Nr. 044](#)). Es bestehen weiterhin erhebliche Wissenslücken hinsichtlich des endgültigen Umweltverbleibs von Nanomaterialien, welche ursprünglich in LMKM bzw. Verbundwerkstoffen verarbeitet wurden (d. h. über genaue Einsatz- und Eintragsmengen, Form, mögliche Transformationsprozesse, toxische Endpunkte, Senken etc.). Generell fehlen umfassende Untersuchungen zur stofflichen oder thermischen Verwertbarkeit von Kompositmaterialien, die nur in Ausnahmefällen – wie z. B. bei PET-Flaschen – wieder als LMKM eingesetzt werden. Über die genaue Rolle von nanoskaligen Additiven und Füllstoffen in Kompositmaterialien während Abfallbehandlungsprozessen und der Deponierung ist derzeit am wenigsten bekannt.

Anmerkungen und Literaturhinweise

- 1 Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Oktober 2004 über Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen und zur Aufhebung der Richtlinien 80/590/EWG und 89/109/EWG.
- 2 Lebensmittelkontaktmaterialien, BMGF: www.bmgf.gv.at/home/Gesundheit/.../Lebensmittelkontaktmaterialien. Zugriff 4.7.17
- 3 Berghofer, E. & Schönlechner R. (2015): Detektion und Analyse von Lebensmitteln. Teil 6 aus „Neue Verfahren und Techniken bei der Lebensmittelherstellung und Lebensmittelversorgung“. Bundesministerium für Gesundheit. https://www.bmgf.gv.at/cms/home/.../6-trends-detektion-langfassung_web.pdf.
- 4 Verordnung (EG) Nr. 450/2009 der Kommission vom 29. Mai 2009 über aktive und intelligente Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen.
- 5 Verordnung (EU) Nr. 10/2011 der Kommission vom 14. Januar 2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen.
- 6 Verordnung (EU) 2015/2283 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 über neuartige Lebensmittel, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 258/97 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EG) Nr. 1852/2001 der Kommission.
- 7 NanosafePACK (2012): Development of a best practice guide for the safe handling and use of nanoparticles in packaging industries. D1.1. Report on the nanoclay and metal oxide nanoparticles employed on the packaging industry. http://www.nanosafepack.eu/sites/default/.../NANOSAFEPACK_D1.1_Report%20on%20Nanoclays%20and%20MONPs_r1.pdf.
- 8 Xanthos, M. (2010): Functional Fillers for Plastics. By Marino Xanthos (Ed.). WILEY-VCH Verlag.
- 9 Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) (2012): Nanomaterialien in Lebensmitteln und Verbraucherprodukten. Anwendungsbereiche, Analytik, rechtliche Rahmenbedingungen. Band 24 der Schriftenreihe Gesundheit und Umwelt. https://www.lgl.bayern.de/publikationen/doc/nanomaterialien_lebensmittel_produkte.pdf.
- 10 EFSA (2014): Scientific Opinion. Statement on the safety assessment of the substance silicon dioxide, silanated, FCM Substance No 87 for the use in food contact materials. EFSA Journal 2014;12(6):3712. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2014.3712/epdf>.
- 11 Siehe dazu: [NanoTrust Dossier Nr. 046](#), Mai 2016 „Oberflächenmodifizierte Nanopartikel Teil I: Arten der Modifikation, Herstellung, Verwendung“ und [NanoTrust Dossier Nr. 047](#), Mai 2016 „Oberflächenmodifizierte Nanopartikel Teil II: Verwendung in Kosmetika und im Lebensmittelbereich, gesundheitliche Aspekte, Regulierungsfragen“.
- 12 <https://de.wikipedia.org/wiki/Kaolin>.

Fazit

Nanomaterialien können die Eigenschaften von Kunststoffen maßgeblich verbessern, weshalb sogenannte „Nanokomposite“ zunehmend Interesse insbesondere für die Herstellung von Lebensmittelverpackungen finden. Nanomaterialien, die in Lebensmittelkontaktmaterialien eingesetzt werden, müssen in der EU zugelassen und einer Sicherheitsbewertung durch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) unterzogen werden. Damit wird sichergestellt, dass von den Nanomaterialien keine Gesundheitsgefährdung für die VerbraucherInnen ausgeht. Über das Umweltverhalten von Nanomaterialien während der Entsorgungsphase von LMKM ist bislang wenig bekannt. Auch zu einer möglichen Freisetzung nanoskaliger Additive während Abfallbehandlungsprozessen und zur Frage der Exposition von ArbeitnehmerInnen bei derartigen Prozessen liegen bislang nur wenige Untersuchungen vor. Hier sind weitere Studien und Expositionsmessungen notwendig. Im Sinne einer nachhaltigen Nanotechnologie muss sichergestellt werden, dass Kunststoffe mit nanoskaligen Additiven im Rahmen der Kreislaufwirtschaft am Ende ihrer Nutzungsphase auch einer sicheren stofflichen oder thermischen Verwertung zugeführt werden können.

- ¹³ EFSA (2014): Scientific Opinion on the safety assessment of the substances, kaolin and polyacrylic acid, sodium salt, for use in food contact materials. EFSA Journal 2014;12(4):3637. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2014.3637/epdf>.
- ¹⁴ EFSA (2005): Opinion of the Scientific Panel on food additives, flavourings, processing aids and materials in contact with food (AFC) on a request related to a 9th list of substances for food contact materials. EFSA Journal (2005)248, 1-16. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2005.248a/full>.
- ¹⁵ DaNa – Informationen zu Nanomaterialien und Nano-Sicherheitsforschung. Titanitrid – Materialinfo. <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/titanitrid/materialinfo-titanitrid>.
- ¹⁶ EFSA (2012): Scientific Opinion on the safety evaluation of the substance titanium nitride, nanoparticles, for use in food contact materials. EFSA Journal 2012;10(3):2641. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2012.2641/epdf>.
- ¹⁷ Unter Schlagzähmodifizierung bzw. Schlagfestmodifizierung wird die Modifizierung eines Werkstoffes zur Erhöhung der Schlagzähigkeit (Schlagfestigkeit) verstanden. http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/schlagz_00228hmodifizierung.glos.html.
- ¹⁸ EFSA (2014): Scientific Opinion on the safety assessment of the substances (butadiene, ethyl acrylate, methyl methacrylate, styrene) copolymer either not crosslinked or crosslinked with divinylbenzene or 1,3-butanediol dimethacrylate, in nanoforn, for use in food contact materials. EFSA Journal 2014;12(4):3635. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2014.3635/epdf>.
- ¹⁹ Majeed K., Jawaid M., Hassan A., Abu Bakar A., Abdul Khalil H.P.S., Salema A.A. & Inuwa I. (2013): Potential materials for food packaging from nanoclay/natural fibres filled hybrid composites. Materials and Design 46 (2013): 391-410.
- ²⁰ Silvestre C., Duraccio D. & Cimmino S. (2011): Food packaging based on polymer nanomaterials. Progress in Polymer Science 36 (2011): 1766-1782.
- ²¹ EFSA (2015): Safety assessment of the substance montmorillonite clay modified by dimethyldialkyl (C16-C18) ammonium chloride for use in food contact materials. EFSA Journal 2015;13(11):4285. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2015.4285/epdf>.
- ²² EFSA (2016): Safety assessment of the substance zinc oxide, nanoparticles, for use in food contact materials. EFSA Journal 2016;14(3):4408. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2016.4408/epdf>.
- ²³ EFSA (2006): Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals. Scientific Committee on Food, Scientific Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies. http://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/efsa_rep/.../ndatolerableuil.pdf.
- ²⁴ Für eine Übersicht siehe z. B.: NanosafePACK (2012): Development of a best practice guide for the safe handling and use of nanoparticles in packaging industries. D1.1. Report on the nanoclay and metal oxide nanoparticles employed on the packaging industry. http://www.nanosafepack.eu/.../NANOSAFEPACK_D1.1_Report%20on%20Nanoclays%20and%20MONPs_r1.pdf.
- ²⁵ Siehe dazu: NanoTrust Dossier Nr. 010, April 2009: „Nanosilber“.
- ²⁶ Food Standards Australia New Zealand (2016): Nanotechnologies in Food Packaging: an Exploratory Appraisal of Safety and Regulation. ToxConsult Pty im Auftrag von FSANZ. <http://www.foodstandards.gov.au/.../Nanotech%20in%20Food%20Packaging.pdf>.
- ²⁷ Echegoyen Y., Rodriguez S. & Nerin C. (2016): Nanoclay migration from food packaging materials, Food Additives & Contaminants: Part A, Vol. 33, Issue 3.
- ²⁸ BfR (2015): Freisetzung von Nanomaterialien aus Kunststoffen. Untersuchungen von polymeren Modellwerkstoffen und deren nanoskaligen Füllstoffen. https://mueef.rlp.de/.../Freisetzung_von_Nanomaterialien_aus_Kunststoffen.pdf.
- ²⁹ Zhang C., Cui F., Zeng G.M., Jiang M., Yang Z.Z., Yu Z.G., Zhu M.Y., Shen L.Q. (2015): Quaternary ammonium compounds (QACs): a review on occurrence, fate and toxicity in the environment. Sci Total Environ, 518-519, 352-62.
- ³⁰ OECD (2015): RECYCLING OF WASTE CONTAINING NANOMATERIALS. ENV/EPOC/WPRPW(2013)2/FINAL. Working Party on Resource Productivity and Waste. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- ³¹ Struwe J., Schindler E. (2012): Bedeutung von Nanomaterialien beim Recycling von Abfällen. Arbeitspapier 270, Hans-Böckler-Stiftung. Mitbestimmungs-, Forschungs- und Studienförderungswerk des DGB. Düsseldorf.
- ³² Boonruksa P., Bello D., Zhang J., Isaacs J.A., Mead J.L., Woskie S.R. (2016): Characterization of Potential Exposures to Nanoparticles and Fibers during Manufacturing and Recycling of Carbon Nanotube Reinforced Polypropylene Composites. Annals of Occupational Hygiene, 60(1), 40-55.
- ³³ Bello D., Wardle B., Yamamoto N., Guzman deVilloria R., Garcia E., Hart A., Ahn K., Ellenbecker M., Hallock, M (2009): Exposure to nanoscale particles and fibers during machining of hybrid advanced composites containing carbon nanotubes. Journal of Nanoparticle Research, 11(1), 231-249.
- ³⁴ Schlagenhauf L., Chu B.T.T., Buha J., Nüesch F., Wang J. (2012): Release of Carbon Nanotubes from an Epoxy-Based Nanocomposite during an Abrasion Process. Environmental Science & Technology, 46(13), 7366-7372.
- ³⁵ Wohlleben W., Kingston C., Carter J., Sahle-De-messie E., Vázquez-Campos S., Acrey B., Chen C.-Y., Walton E., Egenolf H., Müller P., Zepp R. (2017): NanoRelease: Pilot interlaboratory comparison of a weathering protocol applied to resilient and labile polymers with and without embedded carbon nanotubes. Carbon 113, 346-360.
- ³⁶ Wohlleben W., Meyer J., Müller J., Müller P., Vilsmeier K., Stahlmecke B., Kuhlbusch T.A.J. (2016): Release from nanomaterials during their use phase: combined mechanical and chemical stresses applied to simple and multi-filler nanocomposites mimicking wear of nano-reinforced tires. Environmental Science: Nano 3, 1036-1051.

IMPRESSUM

Medieninhaber: Österreichische Akademie der Wissenschaften; Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 130/2003); Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

Herausgeber: Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA); Apostelgasse 23, A-1030 Wien; www.oew.ac.at/ita

Erscheinungsweise: Die NanoTrust-Dossiers erscheinen unregelmäßig und dienen der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung im Rahmen des Projekts NanoTrust. Die Berichte werden ausschließlich über das Internetportal „epub.oew“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt:

epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/

NanoTrust-Dossier Nr. 049, November 2017:
epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier049.pdf

ISSN: 1998-7293

Dieses Dossier steht unter der Creative Commons (Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.0 Österreich) Lizenz: creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de