

Einsatz von Nanomaterialien in Kunststoffverpackungen

1 Einleitung

Verpackungen dienen dazu, Produkte sicher zu transportieren (Transportverpackungen), die in ihr enthaltenen Waren zu schützen (Verkaufsverpackung) oder die Produkte darzubieten (Umverpackung). So werden Produkte unmittelbar nach der Herstellung verpackt, um sie z.B. vor mechanischen Schäden, Staub, Sauerstoff, Licht, Mikroorganismen, Verderb oder Feuchtigkeit zu schützen. Viele Verpackungsmaterialien werden zu Beginn der Nutzung des in ihm enthaltenen Produkts nicht mehr benötigt und entsorgt. Im Jahr 2014 fielen 17,8 Millionen Tonnen Verpackungen in Deutschland an (UBA 2016), Tendenz steigend (2015: 18,2 Million Tonnen Verpackungsabfälle) (UBA 2017a). Verpackungen aus Papier, Pappe oder Karton haben dabei den größten Anteil mit etwa 8,1 Millionen Tonnen. Es folgen Verpackungen aus Kunststoffen (2,9 Millionen Tonnen), Glas (2,7 Millionen Tonnen) und Holz (3,0 Millionen Tonnen) (UBA 2016). Neben der stofflichen und energetischen Verwertung können Verpackungen in einem Mehrwegsystem auch im Kreislauf geführt und dadurch Rohstoffe und Ressourcen eingespart werden. Ist eine Kreislaufführung von Verpackungen nicht möglich, sollte ein hochwertiges Recycling (ohne wesentliche Qualitätsverschlechterung) angestrebt werden.

Aus Umweltsicht sollte es das Ziel sein, Verpackungen zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, sollten mögliche negative Umweltauswirkungen von Verpackungen, die mit der Produktion, dem Transport und der Abfallbehandlung einhergehen, weitestgehend reduziert werden. Das gilt auch für Verpackungen, die Nanomaterialien enthalten. Mögliche Ziele des Einsatzes von Nanomaterialien in Verpackungen, wie Gewichtsverringerung und Materialeinsparung stehen möglichen Nachteilen wie der Anreicherung von Nanomaterialien im Rezyklat, aber auch der möglichen Freisetzung von Nanomaterialien durch sach- oder unsachgemäße Entsorgung der Verpackung entgegen.

Das vorliegende Datenblatt behandelt Nanomaterialien, die neue, technische oder verbesserte Eigenschaften von Verpackungen versprechen. Die zur Beschriftung und Oberflächenbeschichtung von Verpackungen eingesetzten Nanomaterialien sind teilweise die gleichen, die in (Druck-)Farben und Lacken Einsatz finden. Hierzu verweisen wir auf unser Datenblatt „Einsatz von Nanomaterialien in Beschichtungen“ (UBA 2014).

Ein Großteil der möglichen Anwendung von Nanomaterialien in Verpackungen liegt im Bereich von Kunststoffen und Kunststoffverpackungen, daher liegt in diesem Datenblatt der Schwerpunkt auf dem Einsatz von Nanomaterialien in diesen Materialien.

Geringe nanomaterialhaltige Zusätze werden bereits heute eingesetzt, um verschiedene Eigenschaften des Verpackungsmaterials zu verbessern (Goudarzi et al. 2017, Vera et al. 2016). Auf einige Anwendungen soll im Folgenden beispielhaft eingegangen werden, um anschließend mögliche Umweltbe- und -entlastungspotenziale zu beschreiben, auf rechtliche Regelungen einzugehen und Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufzuzeigen.

Einige Nanomaterialien sind in der EU als Lebensmittelkontaktmaterialien derzeit zugelassen, dazu zählen (EU VO 10/2011; EU VO 2015/174; EU VO 2016/1416; EU VO 2017/752):

- nanoskaliges Titannitrid¹ (Nano-TiN)
- Industrieruß^{2,3},
- nanoskaliges Siliziumdioxid⁴ (Nano-SiO₂)
- nanoskaliges Zinkoxid^{5,6}, (Nano- ZnO)
- nanoskaliges Kaolin^{7,8},
- Butadien⁹, Ethylacrylat, Methylmethacrylat, Styrol -Copolymer, das entweder mit Divinylbenzol oder 1,3-Butandioldimethacrylat verbunden oder nicht verbunden ist
- (Methacrylsäure, Ethylacrylat, N- Butylacrylat, Methylmethacrylat und Butadien) – Copolymer in Nanoform¹⁰
- Montmorillonit¹¹

Während nano-TiN Einsatz als Kunststoffadditiv in PET- Flaschen findet (EFSA Journal 2012), um deren thermische und mechanische Eigenschaften zu verbessern, soll Kaolin sowie Montmorillonit die Barriereigenschaften von Kunststoffen verbessern (EFSA Journal 2014b, 2015). Industrieruß wird als Schwarzpigment aber auch als UV- Schutz in Kunststoffen eingesetzt. Letzteres gilt auch für –nano-ZnO (EFSA Journal 2015). Nano-SiO₂ dient als Füllmaterial in Kunststoffen und Kunststoffverpackungen (Arreche et al. 2014; EFSA Journal 2014a). Butadien und Methacrylsäure dienen der Schlagzähigkeitsverbesserung von Kunststoffverpackungen (EFSA Journal 2014, 2015).

Am Einsatz anderer Nanomaterialien in PET-Flaschen, Frischhalteboxen, Verpackungsfolien und Blisterverpackungen wie nanoskaligem Silber (Nano-Ag), Nano-Ton¹², Nanozellulose, Kohlenstoffnanoröhren¹³ (CNT), Graphen¹⁴, Halloysite-Nanotubes¹⁵ (HNT), nanoskaliges Kupferoxid (Nano-CuO) und nanoskaliges Magnesium (Nano-MgO), (Sanchez et al. 2014; Pourzahedi 2016; Roes et al. 2007; Herrera et al. 2017; Vadahanambi et al. 2013; Bumbudsanpharoke und Ko 2015; nanotechproject.org) wird geforscht, teilweise befinden sie sich bereits in Verpackungen für medizinische-, Pflege,- oder Hygieneprodukte.

¹ FCM- Stoff- Nr. 807; EU VO 10/2011

² Auch als Carbon Black bezeichnet ist ein pulverförmiger Feststoff, der je nach Qualität und Verwendung zu 80 bis 99,5 Prozent aus Kohlenstoff besteht, Bezeichnung in EU VO 10/2011 als Kohlenstoffschwarz

³ FCM- Stoff- Nr. 411; EU VO 10/2011

⁴ FCM- Stoff- Nr. 504; EU VO 10/2011

⁵ ungecoated and geocoated mit 3-(methacryloxy)propyl] trimethoxysilane

⁶ FCM- Stoff- Nr. 1046, 1050; EU- VO 2016/1416

⁷ bis zu 12% in Ethylen-Vinylalkohol (EVOH) –Copolymer FCM Nr. 410

⁸ FCM- Stoff- Nr. 410; EU- VO 2015/174

⁹ FCM- Stoff- Nr. 859, 998, 1043; EU VO 2015/174

¹⁰ FCM – Stoff- Nr. 1016; EU- VO 2017/752

¹¹ modifiziert durch Dimethyldialkyl (C16-C18)- ammoniumchlorid (FCM- Stoff Nr. 1030; EU- VO 2017/752)

¹² als Kunststoffzusatz in Lebensmittelverpackungsfolien und Plastikflächen (nicht in der EU zugelassen)

¹³ Carbon Nanotubes (CNTs), Kohlenstoffnanoröhren sind kleinste röhrenförmige Gebilde aus Kohlenstoff

¹⁴ Graphen ist ein zweidimensionales Netzwerk aus Kohlenstoff-Sechsecken

¹⁵ Halloysite Nanotubes sind geogen vorkommende Mineralien, die aus Aluminium Silikat und Tonmineralen bestehen. Die Summenformel lautet Al₂Si₂O₅(OH)₄

2 Ziel des Einsatzes von Nanomaterialien in Verpackungen

Verbesserung der Barriereigenschaften

Nanomaterialien dienen im Verpackungsmaterial als Füllstoffe und können so als Barriere wirken um zum Beispiel den Gas- und Wasserdurchgang zu verhindern (Nasiri et al. 2016; Soares et al. 2012). Verwendung finden hierfür Silikatnanopartikel und Nano-Ton, (Neethirajan et al. 2010). Die Tonplättchen weisen dabei Schichtdicken von ca. 1nm auf und sind einige Nanometer bis wenige Mikrometer lang (Hannon et al. 2015). Nanomaterialien minimieren in Verpackungsmaterialien (u.a. in PET- Getränkeflaschen, aber auch in Verbundfolien) zum Beispiel den Verlust von Kohlendioxid aus dem enthaltenen Getränk.

Biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen

Durch den Einsatz von Nanomaterialien sollen die Eigenschaften von biologisch abbaubaren¹⁶ Kunststoffverpackungen verbessert werden. So soll der Einsatz von Nanozellulose in eine Matrix aus biologisch abbaubarem Kunststoff deren biologische Abbaubarkeit verbessern (Gicquel et al 2017; Ferrer et al. 2017, Herrera et al. 2017). Nanozellulose wird aus Zellulosefasern hergestellt, die als nachwachsender Rohstoff verfügbar sind. Die einzelnen Fibrillen weisen dabei Durchmesser von 2 – 20 nm bei einigen Mikrometern Länge auf (Winterhalter et al. 2012). Die Prozessschritte für die Herstellung sind jedoch sehr energieintensiv. Es gibt bereits einige „Start-ups“, die sich auf die Herstellung von Verpackungsmaterial auf Nanozellulosebasis spezialisiert haben.

Kunststoffverpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen zeigen in Ökobilanzen insgesamt allerdings keine Vorteile gegenüber Verpackungen aus konventionellen Kunststoffen. Ein biologischer Abbau ist in der Regel nur unter den Bedingungen (insb. Temperatur und Feuchte), die in einer industriellen Kompostierungsanlage vorkommen, nachgewiesen. Ein schneller Abbau in der Umwelt ist nicht sichergestellt (UBA 2009). Auch sind Verwertungswege um biologisch abbaubare Kunststoffe zu recyceln nicht vorhanden.

Zur Sicherung der Kompostqualität und zum Schutz der Böden ist auf eine störstofffreie Erfassung von Bioabfällen zu achten. Daher dürfen nur Bioabfälle und mit Bioabfällen gefüllte Sammelbeutel die nach EN 14342 zertifiziert sind und aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen gefertigt wurden, in der Biotonne entsorgt werden (UBA 2018).

Die Eigenschaft der biologischen Abbaubarkeit bietet nach derzeitigem Stand des Wissens keine Grundlage für alternative Konzepte der Verwertung des abfallintensiven Stroms der Verpackungen. Vielmehr könnte sie Irrtümer und Verwechslungen mit konventionellen Kunststoffen sowie die unzulässige Abfallbeseitigung in der Umwelt fördern.

Sämtliche Verpackungen sind der geordneten Verwertung von Verpackungen zuzuführen. Für Verpackungsabfälle gilt die Verpackungsverordnung und demnächst das Verpackungsgesetz. Die Hersteller müssen dabei ihren Verpflichtungen gemäß der Verpackungsverordnung nachkommen, wovon die biologische Abbaubarkeit ausdrücklich nicht entbindet. Verpackungsabfälle sind daher über die gelbe Tonne zu sammeln und den Vorgaben entsprechend zu verwerten.

Verpackungen mit antibakteriellen Eigenschaften (Aktive Verpackungsmaterialien)

An Verpackungen, die mit antibakteriell wirkenden Substanzen beschichtet sind, um einen Schutz vor Bakterien und Pilzen zu gewährleisten, wird bereits geforscht (Möller et al., 2009, Quadri et al. 2016, Turalija et al. 2016), teilweise sind sie sogar schon verfügbar. Zu den

¹⁶ Biologisch abbaubare Kunststoffe können auf Basis von fossilen Rohstoffen als auch auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen erzeugt werden (UBA 2012).

eingesetzten Nanomaterialien zählen Nano-Ag (Sung et al. 2013, Malhotra et al. 2015, Li et al. 2017), Nano-CuO (Tamayo et al. 2016) oder Nano-ZnO (Zhang et al. 2017; Wahab et al. 2010; Lipovsky et al. 2011). Durch antibakterielle Beschichtungen soll die Haltbarkeit von Produkten verlängert und eine Keimfreiheit gewährleistet werden (Farmer 2013). In Europa sind Nano-Ag und Nano-CuO im Lebensmittelverpackungsbereich nicht zugelassen (EC-10/2011, 2011). Nano-ZnO ist als transparenter UV- Absorber, nicht aber wegen einer antibakteriellen Anwendung, von der EFSA bewertet (EFSA Journal 2015) und zugelassen worden (EU VO 2016/1416).

Sensorische Eigenschaften und elektrische Leitfähigkeit (Intelligente Verpackungsmaterialien)

Durch den Einsatz integrierter Technologien, wie NFC¹⁷ oder RFID¹⁸ -Chips, LEDs¹⁹ oder OLEDs²⁰ können Verpackungen zusätzliche Informationen bereitstellen. Durch RFID- oder NFC-Chips lässt sich der Weg von Produkten nachverfolgen und Produkte wiederfinden. Zusätzliche Informationen wie Produktverwendung, Herstellernachweis oder weiterführende Produktinformationen können von einer Verpackung durch ein Endgerät ausgelesen werden. Sehr kleine RFID- oder NFC-Chips lassen sich durch die Integration von CNTs oder Graphen im Druckverfahren herstellen (Burke et al. 2014, Jung et al. 2010). Aufgrund ihrer geringen Produktionskosten könnten sie auch im Verpackungsbereich interessant werden.

Neben der Rückverfolgbarkeit können diese sensorgestützten Systeme Informationen entlang der Lieferkette bis zum Kunden oder zur Verwertung bereitstellen. Auch können durch den Einsatz von Sensoren die Temperatur, Feuchtigkeit oder der Sauerstoffgehalt angezeigt werden (Fuertes et al. 2016). Dadurch können beschädigte Verpackungen und abgelaufene oder gefälschte Produkte oder unsachgemäße Lagerung und unsachgemäßer Transport leichter erkannt werden (Othma 2014). Bei temperatursensiblen Produkten (z.B. Medizinprodukte) könnte die Einhaltung der Kühlkette und bei hochwertigen Produkten (z.B. IT- Technik) der ordnungsgemäße Transport sichergestellt werden.

Die Verwendung von CNTs in Sensoren, die empfindlich auf Ethylen oder Amine reagieren, können den Reife- bzw. Frischezustand von Obst oder Fleisch anzeigen (Hu et al. 2015; Farmer 2013). Bei diesen Verpackungen messen integrierte Sensoren den Gehalt an Sauerstoff oder Spurenstoffen im Inneren der Verpackung und ein Indikator auf der Außenseite der Verpackungen wechselt die Farbe, in Abhängigkeit vom Reifezustand des Produkts. Es gibt bereits Firmen, die sich auf diese Art der Produktüberwachung spezialisiert haben (Möller et al. 2009).

Mit Hilfe von Nano-TiO₂ oder Nano-Cu in Sensoren können Undichtigkeiten oder der Feuchtegehalt von Verpackungen durch einen Farbumschlag angezeigt werden (Suman et al. 2011, Luechinger et al. 2008). Durch Undichtigkeiten kann es zu einer Veränderung der Gaszusammensetzung im Verpackungsgut kommen. Sauerstoff kann an das Produkt gelangen und die Oxidation fördern, mikrobielles Wachstum beschleunigen und die Haltbarkeit der Produkte kann sich verringern. Trotz vielfältiger Forschungsaktivitäten ist die Relevanz dieser Systeme für den deutschen Markt noch sehr gering (UBA 2017).

UV-Schutz

Um lichtempfindliche Produkte vor UV-Strahlen zu schützen, können Verpackungsmaterialien Nano-ZnO (Tyagi et al. 2011), Nano-MgO oder Nano-TiO₂ zugefügt werden (Möller et al. 2009). Dabei kann das Nanomaterial auf Folien oder Beschichtungen für Verpackungen (die transparent sein sollen) eingebracht werden. Es gibt bereits Firmen, die UV-Schutz

¹⁷ Nahfeldkommunikation (Near Field Communication)

¹⁸ Radio-Frequenz-Identifikation

¹⁹ Licht emittierende Dioden

²⁰ Organische Licht emittierende Diode

Verpackungsmaterialien auf Basis von Nano-TiO₂ und Nano-ZnO produzieren (Möller et al. 2009).

3 Umweltauswirkungen

Freisetzung in die Umwelt

Verpackungsmaterialien haben abhängig von der Verpackungsart und der Produktlebensdauer häufig eine sehr kurze Verwendungsdauer. Durch unsachgemäße Entsorgung können sie in die Umwelt gelangen. Dies kann auch die im Verpackungsmaterial enthaltenen Nanomaterialien betreffen, wenn sie aus der Verpackung freigesetzt werden (Han et al. 2018). Dabei ist die Freisetzung von Nanomaterialien aus dem Verpackungsgut von verschiedenen inneren (Matrixbindung) und äußeren Faktoren (Umgebungsbedingungen z.B. Feuchtigkeit, Temperatur, pH, physikalische oder chemische Einwirkung) abhängig.

Nanomaterialien können zum Beispiel durch Migration aus der Verpackung freigesetzt werden (Winterhalter et al., 2012). Die Migration von Nanomaterialien aus der Verpackung kann durch Diffusions-, Abrasions- oder Lösungsprozesse erfolgen. Dabei ist das Verhalten der Nanomaterialien nicht nur abhängig von den physikalisch-chemisch und morphologischen Eigenschaften des Nanomaterials, sondern auch von den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Verpackungsmaterials und auch den des verpackten Produkts (Wyser et al. 2016).

Antibakteriell wirkende Verpackungen sind so gestaltet, dass eine Freisetzung der antibakteriell wirkenden Substanz (z.B. Nano-Ag) über die Nutzungsdauer erfolgt (Mitrano et al. 2015). Aber auch Nanomaterialien, die fest mit der Kunststoffmatrix verbunden sind, können durch chemische oder physikalische Umweltbedingungen (UV- Licht, Ozon) freigesetzt werden und in die Umwelt gelangen (Han et al. 2018).

Bei der Verwertung von Verpackungen kommen verschiedene Verarbeitungsprozesse, z.B. Sortierung, Zermahlen, Zerkleinerung, Wäsche oder Verbrennung in Betracht. Abhängig vom Produktions- und Verwertungsprozess von nanomaterialhaltigen Produkten könnten Nanomaterialien in den Wasserkreislauf, in den Boden oder in die Luft gelangen (Howard 2004, Schindler et al. 2012; Mitrano et al. 2015; Zhang et al. 2016). Die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung im Recyclingprozess (während der Wäsche) oder auf der Deponie (durch Sickerwasser) ist höher, wenn die Verpackung so gestaltet wurde, dass die Nanomaterialien keine feste chemische Bindung mit der Kunststoffmatrix eingehen (Mitrano et al. 2015).

Auswirkung auf die Recyclingfähigkeit

Kunststoffverbundschichten, die aus unterschiedlichen Kunststoffschichten bestehen, werden in den mechanischen Aufbereitungsprozessen in der Regel nicht voneinander getrennt. Daher kann es bei Verpackungen, die aus mehreren Schichten bestehen, zu einer Verschleppung von Zusatzstoffen aus den Verpackungen in die Recycling- und Aufbereitungsprozesse kommen. Das kann nachfolgend zu einer Veränderung der physikalisch-chemischen Eigenschaften im Endprodukt führen. Die Produktqualität kann somit abhängig vom eingesetzten Nanomaterial und von der Produktmatrix im stofflichen Recyclingprozess abnehmen. So kann es zu einer Veränderung der Eigenschaften (Helligkeit, Farbe, Zugfestigkeit oder Reißfestigkeit) in Abhängigkeit von der Kunststoffart und dem eingesetzten Nanomaterial im Rezyklat kommen (Sanchez et al. 2014).

Demzufolge ist eine definierte hochwertige Verwertung für Mehrschichtverpackungen mit aktiven (und intelligenten) Komponenten häufig nicht gegeben (UBA 2017). Daher sollte es das Ziel sein, gerade kurzlebige Verpackungen, wenn eine Vermeidung nicht möglich ist, so zu

gestalten, dass ein hochwertiges Recycling mit geringem Verlust wertvoller Rohstoffe, möglich ist. Der Einsatz von Nanomaterialien in Verpackungen kann diesem Ziel entgegenwirken.

Energetische Verwertung

Bei der energetischen Verwertung von Abfällen besteht die Möglichkeit, dass die in den Verpackungen enthaltenen Nanomaterialien je nach Eigenschaften als Verbrennungsrückstände in der Rostasche, Schlacke oder im Filterstaub zurückbleiben. In Müllverbrennungsanlagen, die mit entsprechenden Abscheidetechniken ausgestattet sind, kann ein unkontrolliertes Entweichen der Nanopartikel nahezu ausgeschlossen werden, da die Rauchgasreinigung die Partikel im Filterstaub wirksam zurückhält (UBA 2016a, Walser et al. 2012).

Bei einer Deponierung von nanomaterialhaltigen Abfällen kann es zum Eintrag von Nanomaterialien in das Sickerwasser kommen (Burkhardt et al. 2015; Kaegi et al. 2017). Ein Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes zur Untersuchung einer möglichen Freisetzung von Nanopartikeln bei der Ablagerung und bodenbezogenen Anwendung von mineralischen Abfällen läuft noch bis August 2018 (<https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/nanotechnik/forschungs-entwicklungsvorhaben>).

Rebound-Effekte

In der Politikanalyse bezeichnet der Rebound-Effekt jene Sekundäreffekte einer technischen oder politischen Maßnahme, welche den ursprünglichen Zielsetzungen der Primärmaßnahme zuwiderlaufen. Rebound-Effekte werden also durch eine Entwicklung oder Maßnahme ausgelöst und reduzieren die damit einhergehende und meist beabsichtigte Wirkung (UBA 2015).

Bisher sind Rebound-Effekte hauptsächlich im Rahmen von ökonomischen Studien untersucht worden. Dabei werden sie in der Regel als Effekte definiert, welche durch Preisänderungen ausgelöst werden: Wird ein Produkt ressourceneffizienter, so sinken die mit dem Produkt einhergehenden Ressourcenkosten, was eine verstärkte Nutzung bzw. Nachfrage zur Folge haben kann (Berkhout et al., 2000; Greening et al., 2000; UBA 2015).

So kann durch den Einsatz von Nanomaterialien in Verpackungen die Haltbarkeit von Produkten verlängert werden. Eine längere Produkthaltbarkeit führt aber nicht zwangsläufig zu einer geringeren Nachfrage bzw. einem geringerem Konsum der Verpackung, sondern kann dagegen zu einer längeren Produktlagerdauer führen. Zum anderen, kann der Einsatz von Nanomaterialien auch als eine Art Rebound-Effekt, wie bereits erwähnt, zur Verminderung der Recyclingfähigkeit von Kunststoffen führen.

Durch sensorische Eigenschaften wird die Rückverfolgbarkeit oder die verbesserte Überwachung der Frische von Produkten und Verpackungen möglich. Allerdings kann es dadurch auch zu einer stärkeren Lebensmittelverschwendung durch unverkäufliche Waren²¹ oder vorzeitige Lebensmittelentsorgung kommen. Ein zusätzlicher Rebound-Effekt ist denkbar, wenn ein Produkt nur für die Sensorausstattung verpackt werden muss.

4 Umweltentlastungspotenzial

Ökobilanzielle Untersuchungen, die ein Umweltentlastungspotenzial bei Verpackungen mit Nanomaterialien untersuchen, gibt es nur vereinzelt. Dazu gehören Studien von Roes et al. 2007, Pourzahedi 2016 und Möller 2009. Häufig ist der Energieaufwand von Nanomaterialien in der Herstellung hoch. Um Umweltentlastungspotenziale zu realisieren, müssen Verpackungen, die

²¹ Verbraucher sortieren im Laden nach Label mit der frischesten Anzeige (vergleichbar mit Sortierung nach längstem Mindesthaltbarkeitsdatum)

Nanomaterialien enthalten, in der Produktions-, Nutzungs- oder Entsorgungsphase Umweltvorteile gegenüber Verpackungen ohne solche Nanomaterialien aufweisen.

Eine Studie von Roes et al. 2007 hat den Einfluss von Nano-Ton (Nano-Ton als Barriereerschicht) in Verpackungsmaterialien aus Polypropylen (PP) auf die Umwelt untersucht und mit dem alleinigen Einsatz von PP verglichen²². Nach Roes et al. führt der Einsatz dieser Kunststoffnanokompositen zu einer Materialeinsparung von 9 %. Durch den zusätzlichen Anteil an Nano-Ton erhöhen sich nicht nur Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften von PP sondern auch die Barriereigenschaften (Roes et al. 2007). In der ökobilanziellen Bewertung wurden verschiedene Wirkkategorien wie CO₂-Emissionen, Verbrauch nicht erneuerbarer Energieträger, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial sowie der Ozonabbau von Kunststoffen mit und ohne Nano-Ton bewertet. Bis auf die Wirkungskategorie zum Verbrauch nicht-erneuerbarer Energieträger, ergeben sich zumindest geringe Vorteile durch den Einsatz von Nano-Ton.

Die CO₂-Einsparungen im Lebenszyklus liegt bei 0,2 kg CO₂eq (15,7 kgCO₂eq statt 15,9 kg/CO₂eq für die konventionelle Verpackung), das Versauerungspotenzial sinkt von 0,12 auf 0,116 kgSO₂-eq und das Eutrophierungspotenzial sinkt um 0.00057 kgPO₄³⁻-eq).²³

Pourzahedi 2016 hat in einer ökobilanziellen Betrachtung die Auswirkung von Nano-Ag auf die verschiedenen Wirkkategorien²⁴ von 15 verschiedenen nanosilberhaltigen Produkten bestimmt. Alle untersuchten Produkte waren am Markt verfügbar. Die Anwesenheit von Nano-Ag wurde durch ein Rasterelektronenmikroskop bestätigt. Zu den untersuchten Produkten zählten u.a. Verpackungen. Der Anteil an Nano-Ag in der Kunststoffdose aus PP lag bei 0,32 % und bei der (Frischhalte-) Tüte aus Kunststoff bei 0,36 %. Der Einfluss von Nano-Ag in den beiden Produkten auf die in der Ökobilanz betrachteten Wirkkategorien ist in fast allen Fällen höher als der Einfluss des eingesetzten Kunststoffs ohne Nano-Ag. Die Belastung für Mensch und Umwelt ist also durch den Einsatz von Nano-Ag höher als ohne. Am höchsten sind die Anteile mit über 90 % beim Einfluss auf die menschliche Gesundheit und im Bereich Ökotoxizität in beiden Produkten (Pourzahedi 2016). Nur der Einfluss auf den Verbrauch fossiler Rohstoffe und die Erderwärmung (Global Warming Potential – GWP), mit weniger als 10 %, können durch den Einsatz von Nano-Ag in beiden Produkten als gering eingeschätzt werden. Hier überwiegt der Einfluss der Kunststoffherstellung. Pourzahedi kommt zu dem Ergebnis, dass der Einfluss auf die Wirkkategorien abhängig vom Anteil an Nano-Ag im jeweiligen Produkt ist (Pourzahedi 2016).

In einer orientierenden Ökobilanz (screening LCA) der TA-Swiss (Stiftung Technologiefolgenabschätzung Schweiz) verursachen PET – Flaschen, die nano-Ton in der Zwischenschicht enthalten, bei der Herstellung, Transport und Recycling 30 % weniger Treibhausgasemissionen als Aluminiumdosen bzw. 60 % weniger als Glas-Einwegflaschen. Allerdings wurden PET Flaschen, die kein nano-Ton enthielten, nicht vergleichend in die Untersuchung mit einbezogen.

Um potentielle Umweltentlastungspotenziale realistisch bewerten zu können, muss bei den Nano-PET-Flaschen die Verträglichkeit mit der etablierten PET-Recyclinginfrastruktur unbedingt beachtet werden. So ist derzeit beispielsweise das Recycling von Multilayer-PET-Flaschen aufgrund der Nanopartikel-Polyamid-Matrix mit Problemen verbunden, während sich

²² Als funktionale Einheit wurde die Menge an Verpackungsmaterial definiert, die benötigt wird für 1000 Tüten, die für den Transport und Schutz von 200 g Süßigkeiten geeignet ist. Eine Tüte wiegt dabei 3,66 g.

²³ Als funktionale Einheit wurde die Menge an Verpackungsmaterial definiert, die benötigt wird für 1000 Tüten, die für den Transport und Schutz von 200 g Süßigkeiten geeignet ist. Eine Tüte wiegt dabei 3,66 g

²⁴ Betrachtete Wirkkategorien in Pourzahedi 2016: Ozonabbau, Erderwärmung, photochemischer Smog, Versauerungspotenzial, Eutrophierung, menschliche Gesundheit (karzinogene Wirkung), menschliche Gesundheit (nicht karzinogene Wirkung), Ökotoxizität, Verbrauch fossiler Rohstoffe

plasmabeschichtete PET-Flaschen im Recycling wie unbeschichtete PET-Flaschen zu verhalten scheinen (Möller 2009).

5 Rechtliche Rahmenbedingungen

REACH/CLP

Die für die Herstellung von Verpackungen innerhalb der EU eingesetzten Stoffe (inklusive derer in nanoskaliger Form) unterliegen den Vorgaben der REACH-VO (EG) Nr. 1907/2006²⁵ und der CLP-VO (EG) Nr. 1272/2008²⁶. Daneben greifen einzelne Vorgaben der REACH-VO (EG) Nr. 1907/2006 auch für Stoffe in den Verpackungen direkt.

Nanomaterialien werden grundsätzlich zwar im Rahmen der Europäischen Chemikalienverordnung REACH mit erfasst, es bestehen aber bislang keine spezifischen Anforderungen, die die Besonderheiten von Nanomaterialien hinsichtlich der Datenbasis und Risikobewertung berücksichtigen (Schwirn et al. 2014). Auf europäischer Ebene werden seit einigen Jahren bereits verschiedene Anpassungsoptionen diskutiert. Auch die Bundesoberbehörden BAuA, BfR und UBA²⁷ hatten bereits 2013 dazu ein gemeinsames Konzept entwickelt²⁸. Im April 2018 hat nun der REACH Regelungsausschuss Änderungen der Anhänge der Verordnung zur Einführung von spezifischen Informationsanforderungen für Nanomaterialien sowie zu Anforderungen der Darstellung von Nanomaterialien im Registrierungsossier und Stoffsicherheitsbericht zugestimmt. Diese Vorgaben werden voraussichtlich ab 1. Januar 2020 wirksam werden.

Die Verordnung zur Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen setzt das von der UN entwickelte global harmonisierte System (GHS) zur Einstufung und Kennzeichnung von Stoffen in europäisches Recht um. Mit der CLP-VO erfolgt eine gefahrenbezogene Einstufung auf Grundlage von definierten Kriterien und Grenzwerten. Diese betreffen alle Chemikalien und sind jeweils auf die vorliegende Form anzuwenden. Dies impliziert, dass berücksichtigt werden muss, ob es sich bei dem Stoff um ein Nanomaterial handelt und dass für eine Einstufungsentscheidung Daten über die relevante Form des Materials benötigt werden.

Verordnung über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen (EU) 10/2011 sowie (EU) 2015/174, EU 2016/1416 und (EU) 2017/752 zur Änderung und Berichtigung der (VO) 10/2011

In der Verordnung sind Lebensmittelkontaktmaterialien geregelt, die aus Kunststoffen bestehen. Die Verordnung geht explizit auf Nanomaterialien ein und enthält eine Positivliste, in der alle zugelassenen Stoffe bzw. Nanomaterialien aufgeführt sind, die hinsichtlich ihrer potenziellen Toxizität und Sicherheit geprüft und zugelassen sind. Eine Bewertung möglicher Umweltrisiken erfolgt nicht.

Verordnung 528/2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten

²⁵ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)

²⁶ Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlamentes und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen

²⁷ BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung; UBA - Umweltbundesamt

²⁸ Nanomaterialien und REACH Hintergrundpapier zur Position der deutschen Bundesbehörden 2013

Nanomaterialien mit einer z.B. antimikrobiellen Funktion gelten gemäß der EU-Biozidverordnung (EU 528/2012) als Biozid-Wirkstoffe und sind als solche genehmigungspflichtig. In der Biozidverordnung wird dabei zum ersten Mal die Empfehlung der EU-Kommission zur Definition von Nanomaterialien rechtlich verbindlich umgesetzt. Die Verordnung besagt, dass Nanomaterialien nur dann als biozide Wirkstoffe eingesetzt werden dürfen, wenn bei der Bewertung des Materials für die vorgesehene Verwendung keine unannehmbaren Risiken für Mensch, Tier und Umwelt festgestellt wurden. Werden Verpackungen zum Schutz der Verpackung selbst oder ihres Inhalts mit Biozidprodukten behandelt und eine entsprechende Funktion ausgelobt, müssen alle in diesen Biozidprodukten enthaltenen Nanomaterialien mit der Zusatzangabe "(nano)" auf dem Etikett ausgewiesen werden. Die eingesetzten bioziden Wirkstoffe in Nanoform müssen zudem explizit als solche genehmigt worden sein.

Verordnung 450/2009 über aktive und intelligente Verpackungsmaterialien

Aktive und intelligente Verpackungsmaterialien werden durch die EU-Verordnung 450/2009 geregelt. Intelligente Verpackungsmaterialien sind dazu bestimmt, den Zustand der Lebensmittel zu überwachen (Wyser, et al. 2016). Sie „informieren den Nutzer über den Zustand des Lebensmittels und sollten ihre Bestandteile nicht an das Lebensmittel abgeben“. Aktive Verpackungsmaterialien im Gegensatz dazu können Stoffe enthalten, die gezielt zur Freisetzung in Lebensmittel bestimmt sind (EU VO 450/2009) (Wyser, et al., 2016).

Abfallrechtliche Bestimmungen

Richtlinie 2008/98/EG

Die Abfallrahmenrichtlinie setzt den rechtlichen Rahmen für die Abfallgesetzgebung. Mit der Richtlinie sollen „die schädlichen Auswirkungen der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen vermieden oder verringert, die Gesamtauswirkungen der Ressourcennutzung reduziert und die Effizienz der Ressourcennutzung verbessert werden“ (Artikel 1). In der Abfallrahmenrichtlinie ist die sogenannte Abfallhierarchie der Vermeidung vor der Verwertung vor der Beseitigung festgeschrieben. Es wird auf gefährliche und nicht- gefährliche Abfälle eingegangen. Die Abfallrahmenrichtlinie enthält keine Regelungen zu Nanomaterialien oder Nanotechnik.

Verpackungsverordnung (VerpackV)

Die VerpackV ist eine dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) nachgeordnete nationale Verordnung und enthält das allgemeine Ziel, die negativen Auswirkungen von Abfällen aus Verpackungen auf die Umwelt zu vermeiden oder zu verringern. Dies wird durch die Abfallhierarchie unterlegt. Danach sind Verpackungsabfälle in erster Linie zu vermeiden; im Übrigen wird der Wiederverwendung von Verpackungen, der stofflichen Verwertung sowie den anderen Formen der Verwertung Vorrang vor der Beseitigung eingeräumt. Zu diesem Zweck sind Mindestverwertungsquoten für die einzelnen Materialien in der VerpackV enthalten. Die Verpackungsverordnung enthält keine Regelungen zu Nanomaterialien oder Nanotechnik.

Am 1.1.2019 löst das Verpackungsgesetz die Nachfolge der Verpackungsverordnung ab. Auch hier gibt es keine spezifischen Regelungen zu Nanomaterialien oder Nanotechnik. Die Ziele der Verpackungsverordnung sind in das Verpackungsgesetz übernommen worden. Darüber hinaus sind mit § 21 des Verpackungsgesetzes duale Systeme verpflichtet, im Rahmen der Bemessung der Beteiligungsentgelte Anreize zu schaffen, um recyclingfähige Materialien und Materialkombinationen und die Verwendung von Recyclaten sowie nachwachsenden Rohstoffen zu fördern.

6 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Hinsichtlich eines umweltfreundlichen Einsatzes von Nanomaterialien im Verpackungsbereich besteht vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Zu den prioritären Aufgaben gehören:

- Überprüfung der Freisetzung von Nanomaterialien aus Verpackungen über den kompletten Lebenszyklus; die Entwicklung einheitlicher und qualitätsgesicherter analytischer Methoden ist Voraussetzung
- Durchführung von Lebenszyklusanalysen und ökobilanziellen Betrachtungen für die Anwendung der Nanotechnik im Verpackungsbereich im Vergleich mit konventionellen Techniken
- Auswirkungen auf Verwertungs- und Recyclingprozesse (z.B. Einfluss auf die Qualität des Rezyklats oder der Anreicherung im Rezyklat)

7 Fazit

Für das Umweltbundesamt ist die frühzeitige Prüfung der Umweltverträglichkeit neuer Techniken und Produkte ein wichtiges Anliegen. Dies gilt insbesondere dann, wenn neuartige Stoffe wie Nanomaterialien in Produkten eingesetzt werden, die auf ihrem Lebensweg in die Umwelt gelangen können.

Um die Auswirkungen von Abfällen aus Verpackungen auf die Umwelt zu verringern, sollten Verpackungsabfälle in erster Linie vermieden werden. Mögliche negative Umweltauswirkungen von Verpackungen, die mit der Produktion, dem Transport, der Verwendung und der Abfallbehandlung einhergehen, sollten weitestgehend reduziert werden. Das gilt auch für Verpackungen, die Nanomaterialien enthalten. Mögliche Umweltvorteile von Verpackungen, die Nanomaterialien enthalten, wie Gewichtsverringerung und Materialeinsparung stehen möglichen Nachteilen wie der schlechteren Recyclingfähigkeit, Rebound-Effekten aber auch der möglichen Freisetzung von Nanomaterialien aus dem Verpackungsgut durch sach- oder unsachgemäße Entsorgung entgegen und sollten sorgfältig abgewogen werden. Insbesondere die nanomaterialinduzierte biologische Abbaubarkeit könnte die Freisetzung von Nanomaterialien erheblich fördern und damit eher einen Umweltnachteil darstellen.

Aus Sicht des UBA sollte es das Ziel sein, gerade kurzlebige Verpackungen, wenn eine Vermeidung nicht möglich ist, so zu gestalten, dass ein hochwertiges Recycling mit geringem Verlust wertvoller Rohstoffe, möglich ist. Der Einsatz von Nanomaterialien in Verpackungen kann diesem Ziel entgegenstehen.

Beim Recycling von Verpackungen mit Nanomaterialien ist ein intensiver Dialog zwischen Herstellern und Entsorgern notwendig, um ein hochwertiges Recycling der Verpackungen zu gewährleisten. Der Einsatz von aktiven und intelligenten Verpackungen ist nicht zwangsläufig notwendig um die Lebensmittelsicherheit zu erhöhen. Lebensmittel sollten geplant eingekauft und richtig gelagert werden, so lässt sich die Wegwerfmenge reduzieren.

Die Einschätzung des potenziellen Umweltrisikos gilt es in Anbetracht der steigenden Einsatzbereiche und -mengen und im Einklang mit neu generiertem Wissen zu Umweltexposition und -effekten periodisch zu aktualisieren.

8 Literaturverzeichnis

Arreche, RB; Martín-Martínez, JM; Vázquez, P. (2014): New Silica Fillers for Polymers used in Food Packaging. *Macromol. Symp.*, 338: 81–89. doi:10.1002/masy.201100183

BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung; UBA - Umweltbundesamt (2013): Nanomaterialien und REACH
Hintergrundpapier zur Position der deutschen Bundesbehörden

Bumbudsanpharoke N und Ko S (2015): Nano-Food Packaging: An Overview of Market, Migration Research, and Safety Regulations; *Journal of Food Science*, Vol. 80 Nr. 5

Berkhout PHG; Muskens JC; Velthuijsen JW (2000): Defining the Rebound effect. *Energy Policy* 28 (2000) 425–432

Burke, P; Rutherglen, J; Christopher, M (2014): In vivo RFID chip. 8830037 B2 US

Burkhardt, M; Dietschweiler, C; Schmidt, S; Hemmann, J (2015): Titandioxid im Sickerwasser von Inertstoffdeponien- Erfassung von Titandioxid-Weisspigmenten als Leitsubstanz für Nanopartikel.

EC- RL- Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

EC-VO- Verordnung 2011/10/EU der Kommission vom 14. Januar 2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen; gestützt auf die 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

EU- VO- Verordnung 2004/1935/EU 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. 2004.

EC-VO- Verordnung 2012/380/EU der Kommission vom 3. Mai 2012 zur Änderung von Anhang II der Verordnung (EG) Nr. 1333/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der für aluminiumhaltige Lebensmittelzusatzstoffe geltenden Verwendungsbedingungen und -mengen

EC- VO- Verordnung 2015/174 der Kommission vom 5. Februar 2015 zur Änderung und Berichtigung der Verordnung EU Nr. 10/2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen

EC -VO- Verordnung 2016/1416 der Kommission vom 24. August 2016 zur Änderung und Berichtigung der Verordnung EU Nr. 10/2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen

EC-VO - Verordnung(EU) 2017/752 der Kommission vom 28. April 2017 zur Änderung und Berichtigung der Verordnung (EU) Nr. 10/2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen

EU-VO-Verordnung 528/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten; Vom 22. Mai 2012

EC- VO- Verordnung 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

EFSA Journal European Food Safety Authority (2004): Opinion of the Scientific Panel on Food Additives, Flavourings, Processing Aids and Materials in Contact with Food (AFC) on a request from the Commission related to a 4th list of substances for food contact materials Question No EFSA-Q-2003-210, EFSA-Q-20. EFSA Journal. 2004.

-. **(2011):** Scientific Opinion on the safety evaluation of the substance, butadiene, styrene, methyl methacrylate, butyl acrylate) copolymer crosslinked with divinylbenzene or 1,3-butanediol dimethacrylate for use in food contact materials, EFSA Journal (2011) 9(4):2123

-. **(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 - 10.2903/j.efsa.2012.2641 [8 pp.].

-. **(2014):** Scientific Opinion on the safety evaluation of the substance, Butadien, Ethylacrylat, Methylmethacrylat, Styrol) –Copolymer - 10.2903/j.efsa.2014.3635- EFSA Journal 2014; 12(4):3635 [8 pp.].

-. **(2014a):** Scientific Opinion on the safety evaluation of the substance, silicon dioxid salinated - 10.2903/j.efsa.2014.3712 - EFSA Journal 2014; 12(6):3712

-. **(2014b):** Scientific Opinion on the safety evaluation of the substance, kaolin and polyacrylic acid -10.2903/j.efsa.2014.3637 EFSA Journal 2014; 12(4):3637

-. **(2015):** Scientific Opinion on the safety assessment of the substance (methacrylic acid, ethyl acrylate, n-butyl acrylate, methyl methacrylate and butadiene) copolymer in nanoform for use in food contact materials - EFSA Journal 2015;13(2):4008

-. **(2016):** - Safety assessment of the substance zinc oxide, nanoparticles, for use in food contact materials - 10.2903/j.efsa.2016.4408 - EFSA Journal 2016; 14(3):4408 [8 pp.].

Farmer, N (2013): Trends in packaging of food, beverages and other fast- moving consumer goods (FMCG), Markets, materials and technologies, Woodhead Publishing

Ferrer, A; Pal, L; Hubbe, M (2017): Nanocellulose in packaging: Advances in barrier layer technologies, Industrial Crops and Products 95, S. 574-582

Fuertes, G.; Soto, I.; Carrasco, R.; Vergas, M.; Sabattin, J.; Lagos, C.; (2016): Intelligent Packaging Systems: Sensors and Nanosensors to Monitor Food Quality and Safety Journal of Sensors Volume 2016, Article ID 4046061

Gicquel, E; Martin C; Garrido Yanez, J; Bras, J (2017): Cellulose nanocrystals as new bio-based coating layer for improving fiber-based mechanical and barrier properties, Journal of Materials Science, 52(6), S. 3048-3061

Goudarzi, V; Shahabi-Ghahfarrokhi, I; Babaei-Ghazvini, A (2017): Preparation of ecofriendly UV-protective food packaging material by starch/TiO₂ bio-nanocomposite: Characterization; International Journal of Biological Macromolecules 95, S. 306-313

Greening, L. A.; D. L. Greene und C. Difulio (2000): Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey. In: Energy Policy 28 (6-7), 389-40.

Gorrasi, G; Senatore, V; Vigliotta, G; Belviso, S; Pucciariello, R (2014): PET-halloysite nanotubes composites for packaging application: Preparation, characterization and analysis of physical properties, Food Research International 69, S. 381-400

Han, C; Cummins, E; Zhaob A, Varaghese E; Sahle- Demessieb E (2018): Evaluating weathering of food packaging polyethylene-nano-clay composites: Release of nanoparticles and their impacts. *NanoImpact* 9, S. 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.10.005>

Hannon, JC; Cummins, E; Kerry, J; Cruz-Romero, M; Morris, M (2015): Advances and challenges for the use of engineered nanoparticles in food contact materials. *Trends in Food Science & Technology*. 43, S. 43-62.

Herrera MA; Mathew AP; Oksman K (2017): Barrier and mechanical properties of plasticized and cross-linked nanocellulose coatings for paper packaging applications - *Cellulose* - S. 1-12.

Howard (2004): Small particles— big problems. *Int Lab News* 34(2), S. 28.

Hu, Y; Ma, X; Zhang, Y; Che, Y; Zhao, J (2015): Detection of Amines with Fluorescent Nanotubes: Applications in the Assessment of Meat Spoilage. *ACS Sensor*.

Jung, M; Kim, J; Noh, J; Lim, N (2010): All-Printed and Roll-to-Roll-Printable 13.56-MHz-Operated 1-bit RF Tag on Plastic Foils. *IEEE*. 57(3).

Kaegi, R; Englert, A; Gondikas, A; Sinnet, B; von der Kammer, F; Burhardt, M (2017): Release of TiO₂ – (Nano) particles from construction and demolition landfills Michael Burkhardt, *NanoImpact* 8 73–79

Li, L; Zhao, C; Zhang, Y; Yao, J; Yang, W; Hu, Q; Wang, C; Cao, C (2017): Effect of stable antimicrobial nano-silver packaging on inhibiting mildew and in storage of rice; *Food Chemistry* Volume 215, (2017), S. 477-482

Lipovsky, A; Nitzan, Y; Gedanken, A; Lubart, R (2011): Antifungal activity of ZnO nanoparticles-the role of ROS mediated cell injury, *Nanotechnology* 22, S.5ff.

Luechinger, NA; Athanassiou, EK; Stark, WJ (2008): Graphene-stabilized copper nanoparticles as an air-stable substitute for silver and gold in low-cost ink-jet printable electronics. *Nanotechnology*. 19(44).

Malhotra, B; Keshwani, A; Kharkwal, H (2015): Antimicrobial food packaging: potential and pitfalls. *frontiers in microbiology*.

Mitrano, DM; Motellier S; Clavaguera, S; Nowack, B (2015): Review of nanomaterial aging and transformations through the life cycle of nano-enhanced products - *Environment International* 77 (2015) 132-147.

Möller, M; Eberle, U; Hermann, A; Moch, K; Stratmann, B (2009): Nanotechnologie im Bereich der Lebensmittel. Zürich: Zentrum für Technologiefolgenabschätzung Schweiz, 2009. 978-3-7281-3234-5.

Nasiri, A; Peyron, S; Gastaldi, E; Gontard, N (2016): Effect of nanoclay on the transfer properties of immanent additives in food packages *Journal of Materials Science* 51 (21), S. 9732-9748

Neethirajan, S; Jayas, DS; (2010): Nanotechnology for the Food and Bioprocessing Industries. *Food Bioprocess Technol*. Februar 19(4), S.39–47.

Othma, SH (2014): Bio- nanocomposite Materials for Food Packaging Applications: Types of Biopolymer and Nano-sized Filler. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2, S. 296 - 303.

Pourzahedi, L. (2016): Environmental Impact Assessment of Nanoparticles and Nano-enabled Products Using LCA Framework

Quadrini, F; Bellisario, D; Santo, L; Tedde, GM (2016): Anti-bacterial nanocomposites by silver nano-coating fragmentation; *Materials Science Forum* 879, S. 1540-1545

- Roes, E; Marsili E; Nieuwlaar M; (2007):** Environmental and Cost Assessment of a Polypropylene Nanocomposite. Journal of Polymer Environment. S. 212-226.
- Sanchez C; Hortal M; Aliaga C; Devis A; Cloquell-Ballester VA (2014):** Recyclability assessment of nano-reinforced plastic packaging - Waste management
- Schindler, E; Struwe, J (2012):** Bedeutung von Nanomaterialien beim Recycling von Abfällen. Düsseldorf: Hans Böckler Stiftung.
- Soares, NFF; Moreira, FKV; Fialho, TL; Melo, NR (2012):** Triclosan-based antibacterial paper reinforced with nano-montmorillonite: A model nanocomposite for the development of new active packaging Polymer for Advanced Technologies 23(5) S. 901-908
- Suman, V; Vikesh G; Kumara, P; Vinod K (2011):** Nanomaterial-based opto-electrical oxygen sensor for detecting air leakage in packed items and storage plants. Journal of Experimental Nanoscience. 7, S. 608-615.
- Sung, SY (2013):** Antimicrobial agents for food packaging applications. Trends FoodSci Technology. 33, S. 110-123.
- Tamayo, L; Azócar, M; Kogan, M; Riveros, A; Páez, M (2016):** Copper-polymer nanocomposites: An excellent and cost-effective biocide for use on antibacterial surfaces Materials Science and Engineering 69, S. 1391-1409
- Turalija, M; Bischof, S; Budimir, A; Gaan, S (2016):** Antimicrobial PLA films from environment friendly additives, Composites Part B: Engineering Volume 102, S. 94-99
- Tyagi, S; Tyagi, R; Thapliyal, BP; Mathur, RM; Ray, A (2011):** Surface and aging characteristics of paper coated with nano size zinc oxide pigment
- UBA (Umweltbundesamt) Datenblatt (2013):** Einsatz von Nanomaterialien in Textilien; Dubbert, W; Schwirn, K; Völker, D; Apel, P; Zietlow, B; Winde, C
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/datenblatt_nanoprdukte_textilien_0.pdf
- . (2014):** Einsatz von Nanomaterialien in Beschichtungen; Dubbert, W; Schwirn, K; Völker, D; Apel, P
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/einsatz_vo_n_nanomaterialien_in_beschichtungen_0.pdf
- UBA (Umweltbundesamt) Texte (2009):** Biologisch abbaubare Kunststoffe - UBA Hintergrundpapier 2009 - Wolfgang Beier;
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3834.pdf>
- . (2012):** Untersuchung der Umweltwirkungen von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen; UBA Texte 52/2012; Forschungskennzahl 37 10 95 314;
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3986.pdf>
- . (2015):** Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik, UBA Texte 2015/31; Forschungskennzahl 3711 14 104;
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_31_2_015_rebound-effekte_ihre_bedeutung_fuer_die_umweltpolitik.pdf
- . (2016):** Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2014- Kurt Schüler, GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung; UBA Texte 64/2016;
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_64_2_016_aufkommen_und_verwertung_von_verpackungsabfaellen_2014.pdf

- **(2016a)**: Untersuchung möglicher Umweltauswirkungen bei der Entsorgung nanomaterialhaltiger Abfälle in Abfallbehandlungsanlagen; Börner R, Meiller M, Oischinger J, Daschner R; UBA TEXTE 37/2016;
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_37_2016_untersuchung_moeglicher_umweltauswirkungen_bei_der_entsorgung_nanomaterialhaltiger_abfaelle.pdf
- **(2017)**: Umweltbezogene Bilanzierung von „intelligenten“ und „aktiven“ Verpackungen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit und Durchführung eines Dialogs mit Akteuren der Entsorgungs- und Herstellungsbranchen -
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbezogene-bilanzierung-von-intelligenten> - UBA Texte 22/2017
- **(2017a)**: Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2015; UBA Texte 106/2017;
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-29_texte_106-2017_verpackungsabfaelle-2015.pdf
- **(2018)**: Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe; UBA Texte 57/2018; Burgstaller, M; Potrykus, A; Weißenbacher, J; Kabasci, S; Merrettig-Bruns, U; Sayder, B;
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gutachten-zur-behandlung-biologisch-abbaubarer>
- Vadahanambi, S; Gangaraju, D; Chun HW; Park H (2013)**: Blister Packing of Copper Hydroxide and Titania Nanoparticles on Graphene and Its Recycling, Applied Material and Interface 5 (23), S. 12323–12328
- Vera, P; Echegoyen, Y; Canellas, E; Nerín, C; Palomo, M; Madrid, Y.,Cámara, C.Nano (2016)**: selenium as antioxidant agent in a multilayer food packaging material, Analytical and Bioanalytical Chemistry Volume 408(24), S. 6659-6670
- Verpackungsverordnung – VerpackV (1998)**: Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen vom 21.08.1998
- Wahab, R; Mishra, A; Yun, SI; Kim, YS; Shin, HS (2010)**: Antibacterial activity of ZnO nanoparticles prepared via non-hydrolytic solution route, Appl. Microbiol. Biotchnol. 87; S.1917–1925.
- Winterhalter, R; Matzen, W; Kohlhuber, M; Völkel, W; Fromme, H (2012)**: LENA - Lebensmittelsicherheit und Nanotechnologie. s.l. : Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit.
- Wyser, Y; Adams, M; Avella, M; Carlander, D; Garcia, L; Pieper, G; Rennen, M; Schuermans, J (2016)**: Outlook and Challenges of Nanotechnologies for Food Packaging. Packaging Technology and Science.
- Zhang, H; Hortal, M; Jordá-Beneyto, M; Rosa, E; Lara-Lledo, M; Lorente, I (2017)**: ZnO-PLA nanocomposite coated paper for antimicrobial packaging application; LWT - Food Science and Technology Volume (78) S. 250-257
- Zhang, H; Bussini D; Hortal M; Elegir G; Mendes J; Beneyto MJ (2016)**: PLA coated paper containing active inorganic nanoparticles: Material characterization and fate of nanoparticles in the paper recycling process – waste management

Autoren

Das Datenblatt wurde von Mitgliedern des Arbeitskreises „Nanotechnik“ des Umweltbundesamtes erstellt. Insbesondere haben daran mitgewirkt:

Christian Liesegang (III 2.1 – Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen)

Dr. Kathrin Schwirn (IV 2.2 – Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel, Nanomaterialien)

Dr. Doris Völker (IV 2.2 – Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel, Nanomaterialien)

Weitere Zuarbeiten erfolgten von:

Gerhard Kotschik (III 1.6– Produktverantwortung)

