

Sabine Greßler, Stefanie Prenner,
Andrea Kurz, Susanne Resch,
Anna Pavlicek*, Florian Part*

Zusammenfassung

Kunststoffen werden unterschiedliche Additive zugesetzt, um entweder die Verarbeitbarkeit zu verbessern, die Produkteigenschaften zu verändern oder um sie gegen Wärme, UV- bzw. Lichteinflüsse zu schützen. Bei einem Polymer-Nanokomposit weisen die Additive zumindest in einer Dimension eine Größenordnung von unter 100 nm auf und können plättchen-, faser- oder partikelförmig sein. Sie dienen vor allem der Verbesserung der Zugfestigkeit, der Wärmeformbeständigkeit, des Brandschutzes, der optischen und elektrischen Eigenschaften sowie der Barriereeigenschaften des Kunststoffes. Zu den Nano-Additiven zählen Schichtsilikate wie Montmorillonit, kohlenstoffbasierte Additive (z. B. Carbon Black, Carbon Nanotubes, Graphen), nanoskalige Metalloxide (z. B. SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3), Metalle (z. B. Nanosilber, -gold, -kupfer) oder organische Additive wie Nanocellulose oder Lignin-Nanopartikel. Neben der Ressourceneinsparung und der Gewichtsreduktion haben Nano-Additive auch das Potenzial schädliche Substanzen, wie z. B. umweltproblematische halogenierte Flammenschutzmittel, zu ersetzen. Polymer-Nanokomposite finden weltweit bereits in Verpackungsmaterialien, der Automobilindustrie und dem Transportwesen, der Luft- und Raumfahrt sowie in der Energietechnologie, aber auch in Sportartikeln, Anwendung. Unternehmensbefragungen in der österreichischen Automobil- und Elektronikindustrie haben jedoch gezeigt, dass Nano-Additive derzeit in diesen Branchen noch eine untergeordnete Rolle spielen. Die Gründe sind vor allem Probleme mit der Dispergierbarkeit, die Herstellung in größerem Maßstab, ein zu hohes Preisniveau und ein ungewisser Einfluss auf Mensch und Umwelt. In Hinblick auf Freisetzung, Exposition und Umweltverhalten bestehen noch erhebliche Wissenslücken und Forschungsbedarf.

* Korrespondenzautoren:

anna.pavlicek@oeaw.ac.at oder
florian.part@boku.ac.at

Polymer-Nanokomposite

Additive, Eigenschaften, Anwendungen,
Umweltaspekte

Einleitung

Kunststoffe bestehen vorwiegend aus organischen Polymeren (Matrix), die mit Additiven einen Verbund eingehen. Daher zählen Kunststoffe zu den Verbundwerkstoffen und werden auch Polymerkomposite genannt. Kunststoffen, wie etwa Polyester (z. B. Polyethylenterephthalat, PET), Polyolefine (z. B. Polypropylen, PP) oder Polyamiden (PA) werden Additive zugesetzt, um entweder die Verarbeitbarkeit zu verbessern, die Produkteigenschaften zu verändern oder um sie gegen Wärme- oder UV-Lichteinflüsse zu schützen. Zu den Kunststoff-Additiven zählen Antioxidantien, Lichtschutzmittel, PVC-Stabilisatoren, Säurefänger, oberflächenaktive Zusatzstoffe, Nukleierungsmittel und Transparenzverstärker, Farbstoffe, optische Aufheller, Treibmittel, Flammenschutzmittel sowie Füllstoffe und Verstärkungsmittel. Des Weiteren können auch Additive mit biozider Wirkung zugesetzt werden.¹ In den letzten Jahrzehnten hat sich das Forschungsgebiet rund um Kunststoff-Additive durch den Einsatz von Nanomaterialien rasant weiterentwickelt.² Bei einem Nanokomposit weisen die Additive zumindest in einer Dimension eine Größenordnung von unter 100 nm auf und können plättchen-, faser- oder partikelförmig sein. Sie dienen dabei vor allem der Verbesserung der Zugfestigkeit, der Wärmeformbeständigkeit, des Brandschutzes, der optischen und elektrischen Eigenschaften und der Barriereeigenschaften des Kunststoffes.

Da die interagierenden Grenzflächen zwischen nanoskaligem Additiv und Matrix wesentlich größer sind als bei mikroskaligen Zusätzen, sind deutlich geringere Mengen notwendig (< 5 Gewichtsprozent), um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen, wodurch ein Nanokompositmaterial leichter wird als ein konventionelles Polymer.³ Um die Verarbeitbarkeit und gleichmäßige Verteilung (Dispergierung) im Polymer zu ermöglichen bzw. zu erleichtern, wird die Partikeloberfläche der nanoskaligen Additive (Nano-Additive) zumeist modifiziert.⁴ Auch biobasierten Kunststoffen aus Stärke, Zellulose oder Polymilchsäure können zur Verbesserung der Eigenschaften Nano-Additive zugesetzt werden. Konkrete Anwendungen finden sich vor allem im Be-

reich Elektronik, Verpackungsmaterialien⁵, im Automobil- und Flugzeugbau, in der Medizintechnik sowie bei Sportartikeln.

Das vorliegende Dossier gibt einen Überblick über die verschiedenen Arten von Nano-Additiven und deren Anwendungsbereiche in der Praxis sowie Forschung und Entwicklung. Zusätzlich werden Umweltaspekte entlang des Produktlebenszyklus von Nanokompositen diskutiert.

Nano-Additive

Schichtsilikate („Nano-Ton“)

Schichtsilikate, wie Kaolin, Talk oder Montmorillonit, sind natürlich vorkommende Tonminerale und gehören zu den am häufigsten untersuchten Nanomaterialien für die Herstellung von Polymer-Nanokompositen.³ Vor allem Montmorillonit ist Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten und findet bereits Anwendung. Nanoskaliges Montmorillonit ist ein Natrium-Aluminium-Silikat und wird auch „Nano-Ton“ genannt (engl. „nanoclay“), da diese Schichtsilikate mindestens eine Dimension im Nanometermaßstab aufweisen. Die Dicke der Plättchen beträgt nur einen bis einige wenige Nanometer, die Länge mehrere Hundert bis Tausende Nanometer. Die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen, wie Zugfestigkeit, Bruchfestigkeit und Formbeständigkeit, lassen sich durch den Zusatz von Schichtsilikaten verbessern. Darüber hinaus weisen derartige Polymer-Nanokomposite eine hohe Beständigkeit gegenüber Chemikalien und eine gute Barriereeigenschaft gegenüber Gasen auf.⁵

Sowas in Abbildung 1 dargestellt, verhindern „Nano-Tone“, die beispielsweise Verpackungsfolien aus Polypropylen oder Polymilchsäure zugesetzt werden, die Diffusion von Sauerstoff oder Aromastoffen und verlängern somit die Haltbarkeit von Lebensmitteln. Schichtsilikate kommen in großen Mengen natürlich vor und lassen sich ebenfalls kostengünstig synthetisch herstellen.⁶ Eine homogene Verteilung der Plättchen in der Kunststoffmatrix ist für die Verbesserung der Ei-

genschaften entscheidend, weshalb die natürlich in Form von Paketen vorliegenden Plättchen oberflächenmodifiziert werden, um die Auftrennung der einzelnen Plättchen (Interkalation oder Exfolierung) und somit ihre Dispergierbarkeit zu erleichtern. Durch das hohe Aspektverhältnis der Plättchen, d. h. die sehr geringe Dicke im Verhältnis zu Breite und Länge, entsteht eine große Grenzfläche zwischen Matrix und Schichtsilikat, sodass schon wenige Gewichtsprozent ausreichen, um die mechanischen Eigenschaften des Komposits gegenüber dem reinen Kunststoff erheblich zu verbessern. So kann z. B. die Zugfestigkeit von Polystyrol-Montmorillonit-Kompositen je nach Verteilung der Partikel und Oberflächenbehandlung um 70-560 % erhöht werden. Das Elastizitätsmodul steigt auf das 7- bis 10-fache. Ebenso wird die Abrieb- und Kratzfestigkeit von Oberflächen erhöht.⁶

Polymer-Schichtsilikat-Nanokomposite finden international bereits in Verpackungsmaterialien wie Kunststoffflaschen für Kohlensäurehaltige Getränke Verwendung. Bereits seit 1993 werden Autoteile, etwa Zahnriemen, Karosserieteile und Treibstofftanks aus einem Polyamid-Montmorillonit-Kompositmaterial (Nylon-6) hergestellt.⁷ Insbesondere in der Automobil- und Luftfahrtindustrie spielt die Gewichtsreduktion eine wichtige Rolle, um den Treibstoffverbrauch reduzieren zu können. Bei der Herstellung von Karosserieteilen verspricht der Einsatz von mit „Nano-Ton“ verstärkten Polymerkompositen anstelle von Stahl mögliche Vorteile, um Energie einzusparen und den CO₂-Ausstoß zu verringern.⁸

Auch die Entflammbarkeit von Polymerkompositen kann durch Montmorillonit verringert werden, weshalb sich derartige Komposite auch zur Herstellung von Produkten eignen, die erhöhte Anforderungen an den Brandschutz stellen, wie z. B. Kabelummantelungen. Schichtsilikate ha-

ben somit das Potenzial umweltproblematische Flammenschutzmittel (FSM), wie halogenierte Verbindungen, ersetzen zu können bzw. deren Einsatz zumindest zu reduzieren, wenn diese in Kombination mit anderen FSM verwendet werden.⁹ Für die flammhemmenden Effekte ist vorrangig die Bildung einer thermisch isolierenden und für flüchtige Zersetzungsprodukte nur wenig durchlässigen Krustenschicht maßgeblich.¹⁰

Biobasierte Kunststoffe, etwa aus Stärke, sind empfindlich gegenüber Feuchtigkeit und weisen oft schlechte mechanische Eigenschaften auf. Der Zusatz von „Nano-Ton“ kann die Eigenschaften erheblich verbessern und sogar die Desintegration bzw. Zersetzung von biologisch abbaubaren Kunststoffen beschleunigen, wie erste Untersuchungen zeigen.¹¹

Schichtsilikate sind nicht toxisch, unter bestimmten Bedingungen können sich daraus jedoch für die menschliche Gesundheit bedenkliche Aluminiumionen lösen, weshalb für eine Verwendung von Polymer-Montmorillonit-Kompositen in Lebensmittelkontaktmaterialien, wie Verpackungen, gesetzliche Vorgaben gelten.⁵ Umweltrisiken sind nach derzeitigem Kenntnisstand durch Schichtsilikate nicht zu erwarten, jedoch sind die für deren Oberflächenmodifikation eingesetzten quartären Ammoniumverbindungen (QAV) toxisch für aquatische Organismen und biologisch schwer abbaubar. Weggeworfene Kunststoffverpackungen unterliegen der Verwitterung, wodurch QAV aus der Polymermatrix freigesetzt werden und in Gewässer gelangen können.¹²

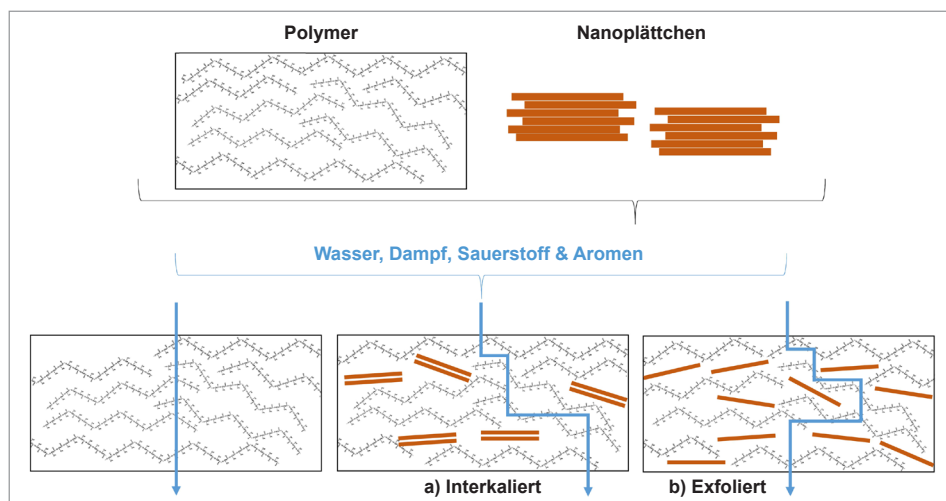
Kohlenstoff-basierte Nano-Additive

Das derzeit am häufigsten eingesetzte auf Kohlenstoff basierende Nano-Additiv in Polymeren ist der Industrieuß (**Carbon Black**), der durch unvollständige Verbrennung oder thermische

Zersetzung von gasförmigen oder flüssigen Kohlenwasserstoffen unter kontrollierten Bedingungen hergestellt wird. Carbon Black ist ein feines Pulver, dessen Primärpartikel in einer Größenordnung von 15-300 nm vorliegen und auch Agglomerate im Mikrometerbereich bilden.¹³ Eingesetzt wird Carbon Black für die verschiedensten Produkte, so wird es etwa zum UV-Schutz von Kunststoffen genutzt und findet aufgrund seiner Leitfähigkeit auch Einsatz im Bereich der Elektroindustrie und der Elektronik. Die Polymermatrix von Autoreifen enthält schon seit Jahrzehnten dieses Material. Durch den Einsatz dieses Additivs wird die UV-Beständigkeit sowie Verschleiß- und Abriebfestigkeit verbessert, wodurch eine erhöhte Kilometerleistung sowie geringere Partikel-Emissionen pro gefahrenem Kilometer möglich werden.¹⁴ Der Gehalt an Carbon Black in Autoreifen (sowohl nano- als auch mikroskali) liegt zwischen 22 und 45 %.¹⁵ Aufgrund dieser hohen Anteile wird bei Autoreifen auch oft von „Nanofüllstoffen“ gesprochen.

Die Deutsche Bundesanstalt für Straßenwesen schätzt, dass durch Reifenabrieb jährlich ca. 111.000 t an Feinstaub freigesetzt werden. Für Österreich würde dies einer Menge von rund 12.000 t pro Jahr entsprechen (vereinfacht über die EinwohnerInnenzahl umgerechnet). Der größte Anteil an abgeriebenen Partikeln besteht aus Kautschuk und anderen Polymeren (38 %) sowie aus Carbon Black (34 %), der Rest aus leicht flüchtigen Substanzen, Zink und anderen Schwermetallen.¹⁶ In einer Freisetzungstudie im Labormaßstab bei der unterschiedlichen Gummimischungen untersucht wurden unterzog man Reifen einem mechanischen Schleifprozess, der den Abrieb während des Fahrens simulierte. Nach dieser Beanspruchung der Reifen wurden zwei unterschiedliche Analyseszenarien erstellt, in denen Regentage sowie Tage ohne Regen simuliert wurden. Dabei kam es zu einer weiteren Zerkleinerung der ursprünglich freigesetzten Partikel durch Hydrolyse sowie UV-Prozesse. Das Ergebnis dieser Studie zeigte, dass ca. 4,5 % der freigesetzten Partikel unter 5 µm und bis zu 0,045 % im Nanometerbereich waren.¹⁷ Die Freisetzung solcher Mikro- und Nanopartikel führt zu erhöhter Ultra-/Feinstaubbelastung entlang von Straßen und in weiterer Folge zur Luftverschmutzung bzw. zu Atemwegs- oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen.¹⁸ Mit Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft wurden im Jahr 2017 in Österreich rund 5 % der gesammelten Altreifen runderneuert und 41 % einem stofflichen Recycling zugeführt (ca. 54 % werden thermisch verwertet).¹⁹ Während des Recyclingprozesses werden die Altreifen mechanisch zerkleinert, wodurch ebenso luftseitige Emissionen entstehen können.^{20, 21} Hierzu gibt es jedoch keine genaueren Untersuchungen. Das resultierende Kunststoff-Regranulat wird anschließend im Straßenbau, Sportstättenbau, in der Gummi-Industrie oder Bauchemie verwen-

Abbildung 1: Interkalierte (a) oder exfolierte (b) Nanoplättchen, welche Barriereigenschaften von Kunststoffen verbessern.



det.²² Die ursprünglich eingesetzten Nano-Additive sind höchstwahrscheinlich zu einem unbestimmten Prozentanteil im Regranulat wiederzufinden und können somit in diverse Recyclingprodukte unbeabsichtigt verschleppt werden.

Der Einsatz von Nanomaterialien wie Carbon Black oder „Nano-Ton“ in Reifen kann daher sowohl positive als auch negative Einflüsse auf die Umwelt ausüben (z. B. verringerter Treibstoffverbrauch durch gesenkten Rollwiderstand vs. Partikelfreisetzung durch Reifenabrieb). Die OECD führte im Jahr 2014 eine Studie durch, um etwaige positive als auch negative Auswirkungen entlang des Lebenszyklus – von der Herstellung bis zur Entsorgung – möglichst umfassend zu untersuchen. Dabei wurde eine Kosten-Nutzen-, Multi-kriterien- sowie Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Nach derzeitigem Stand des Wissens würden die Positiveffekte von Siliziumdioxid und „Nano-Ton“, insbesondere während der Produktions- und Nutzungsphase, überwiegen. Jedoch war die verfügbare Datenlage mit zu hohen Unsicherheiten behaftet, um allgemein gültige Aussagen treffen zu können. Zur Bereitstellung von quantitativen, belastbaren Daten werden daher industriespezifische Leitfäden sowie eine engere Zusammenarbeit zwischen den zuständigen Behörden und der Industrie gefordert.²³

Gegenwärtig wird auch verstärkt an **Kohlenstoff-nanoröhrchen** (engl. Carbon Nanotubes, kurz CNTs) als Additiv in der Reifenherstellung geforscht.¹⁷ CNTs bestehen aus graphitartigem Kohlenstoff. Sie weisen einen Durchmesser von etwa 1 bis 100 nm auf und können bis zu einigen Mikrometern oder gar Millimetern lang werden. Es gibt einwandige (Single Wall Carbon Nano Tubes, SWCNTs) und mehrwandige Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Multi Wall Carbon Nanotubes, MWCNTs). CNTs besitzen außergewöhnliche mechanische und elektrische Eigenschaften und eignen sich für zahlreiche Anwendungen.²⁴ Eine weitere Klasse von auf Kohlenstoff basierenden Nanomaterialien ist **Graphen**, bestehend aus einer einatomigen Lage reinen Kohlenstoffs mit einer Stärke von nur rund 0,3 nm.²⁵ Graphen kann mit Sauerstoff zu **Graphenoxid** umgewandelt werden, das ebenfalls als Additiv in Kunststoffen eingesetzt werden kann.

Wegen ihrer hohen Festigkeit, Bruchzähigkeit und chemischen Beständigkeit sowie des möglichen geringen spezifischen Gewichts sind Nanokomposite mit CNTs und Graphen vor allem für solche Anwendungen interessant, bei denen möglichst leichte oder sehr harte und widerstandsfähige Materialien benötigt werden. Das betrifft vor allem Bereiche, die eng mit dem Leichtbau verknüpft sind, wie das Transportwesen, die Raumfahrt, die Energietechnologie oder auch Sportartikel, wie z. B. Fahrräder. Auch für die Herstellung von Rotorblättern für Windkraftanlagen sind

derartige Nanokomposite von Interesse.²⁶ CNTs und Graphen eignen sich auch zur Herstellung elektrisch ableitfähiger thermoplastischer Polymerkomposite, etwa für Verpackungen elektronischer Bauteile oder im Automobilssektor für Treibstoffsysteme. Aufgrund seiner hervorragenden Wärmeableitungseigenschaften ist Graphen auch interessant für die Herstellung von elektrischen und elektronischen Produkten, da eine zu starke Hitzeentwicklung deren Lebensdauer erheblich reduziert.²⁷ Ebenfalls von Interesse ist die flammhemmende Wirkung dieser Nano-Additive. Die Herstellung von Graphen und CNTs ist noch relativ teuer und die Qualität der lieferbaren Additive entspricht teilweise noch nicht den Anforderungen der Industrie. Dies und die technischen Probleme bei der homogenen Verteilung in der Matrix stellen noch Hemmnisse für einen breiten Einsatz von Polymer-Nanokompositen mit Graphen und CNTs dar, sodass sich die konkreten Anwendungen derzeit noch auf Spezialanfertigungen oder Nischenprodukte beschränken.²⁶ Die einzigartigen Eigenschaften von Graphen und deren mannigfaltigen Anwendungsmöglichkeiten – von hitzebeständigen, hochfesten Polymerkompositen bis zu hocheffizienten Solarzellen und kratzbeständigen Autolacken – werden derzeit im Rahmen des EU-Projekts *Graphene Flagship* erforscht.²⁸

In Hinblick auf ArbeitnehmerInnenschutz-Aspekte stellen CNTs aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit Asbestfasern ein Gesundheitsrisiko dar.²⁹ Sind die Additive fest in eine Matrix eingebunden, ist nach derzeitigem Kenntnisstand das Risiko für Mensch und Umwelt gering, kann aber nicht völlig ausgeschlossen werden.³⁰ Bezüglich Freisetzung, Exposition und Umweltverhalten bestehen jedoch noch erhebliche Wissenslücken.³¹ Mögliche Freisetzungspfade, die im Laufe des Lebenszyklus von Nanokompositen auftreten könnten, sind neben der Herstellung etwa auch Bearbeitungs- oder Abfallbehandlungsprozesse, wobei Nano-Additive durch fräsen, bohren, schreddern oder verbrennen freigesetzt werden können. Erste Untersuchungen zeigen, dass bei Temperaturen ab 850 °C mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen (MWCNTs) vollständig verbrennen, Graphen-Plättchen jedoch in den Verbrennungsrückständen verbleiben. Werden CNTs oder Graphen als Additive in biologisch abbaubaren Kunststoffen eingesetzt, besteht auch die Möglichkeit einer Freisetzung während des Abbauprozesses (z. B. in einer Deponie oder mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlage)³². Zu den möglichen Umweltentlastungspotenzialen und Nachhaltigkeitseffekten, etwa durch Ressourceneinsparungen aufgrund einer Gewichtsreduktion von Werkstoffen, fehlen bislang noch umfassende Lebenszyklus-Analysen, die derzeit aufgrund von fehlenden Daten noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind.^{33:34} Zum Verhalten von Nano-Additiven während der Abfallbehandlung oder

Deponierung ist derzeit ebenso wenig bekannt, wobei die Freisetzung aus Deponien, v. a. in Ländern, wo keine Abfallvorbehandlung vor einer Deponierung gefordert ist, nicht ausgeschlossen werden kann und die Mobilität in Deponiesickerwässern von den vorherrschenden Umweltbedingungen (vorwiegend vom Gehalt an organischen Substanzen und Elektrolyten) sowie von der ursprünglichen Oberflächenmodifikation (Partikel-coating) des Nanomaterials abhängen.³⁵

Nano-Metalle und -Metalloxide

Die am häufigsten in Polymerkompositen eingesetzten Nano-Oxide sind **Siliziumdioxid (SiO₂)**, **Aluminiumoxid (Al₂O₃)** und **Titandioxid (TiO₂)**, vor allem um deren Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Einflüssen zu erhöhen und die Abnutzung zu verringern. Auch die Hitzebeständigkeit lässt sich durch Einsatz von Nano-Oxiden verbessern.³ Nano-TiO₂ kann darüber hinaus auch als UV-Schutz für Kunststoffe dienen.³⁶ Für eine brandhemmende Wirkung bei Kunststoffen müssen Flammschutzmittel (FSM) zugesetzt werden. In den letzten Jahrzehnten wurde der Einsatz von nanoskaligen FSM, wie ultrafeines **Aluminiumhydroxid (Al(OH)₃)** bzw. **ATH**, **Magnesiumhydroxid (Mg(OH)₂)** oder **Antimonoxid (Sb₂O₃)**, erforscht.² Darüber hinaus werden ultrafeines Sb₂O₃, **Zinkborat**, **doppel-lagige Hydroxide** (z. B. Hydrotalkit oder **poly-edrisches, oligomeres Silsesquioxan (POSS)**), aber auch „Nano-Ton“ und CNTs, als sogenannte Synergisten eingesetzt, um die Brandhemmung anderer FSM verbessern zu können.² Diese halogenfreien Nano-Additive haben großes Potenzial, um halogenierte FSM – welche teilweise krebserregend und hormonaktiv sein können und daher in der EU verboten wurden (z. B. Octabromdiphenylether)³⁷ – in naher Zukunft zu ersetzen.

Nanosilber weist eine antimikrobielle Wirkung auf und kann in Kunststoffen etwa zur Herstellung von Lebensmittelverpackungen, wie Folien oder Behälter, eingebracht werden, um Lebensmittel vor dem Verderb zu schützen. In der EU ist Nanosilber allerdings bislang nicht für Lebensmittelkontaktmaterialien zugelassen. Es bestehen Bedenken hinsichtlich möglicher Risiken für die menschliche Gesundheit und vor allem für die Umwelt, sollten gelöste Ionen aus den Nanosilberpartikeln in Gewässer gelangen.³⁸ Darüber hinaus wird Nanosilber, wie auch **Nanogold und -kupfer**, Graphen-Plättchen, Graphenoxid oder CNTs, aufgrund ihrer elektrisch leitfähigen Eigenschaften in flexiblen Elektronikgeräten verwendet.

Mittels 2D-Printing werden Nanomaterial-haltige Tinten auf unterschiedliche Substrate, wie Polyethylenterephthalat (PET), Polyimid (PI) oder Polyethylenaphthalat (PEN), aber auch auf Textilien und Solarzellen aufgebracht.³⁹ Der Markt für

gedruckte, flexible und organische Elektronik wurde für 2018 auf insgesamt ca. 31 Mrd. USD geschätzt und soll sich in den nächsten 10 Jahren mehr als verdoppeln.⁴⁰ Des Weiteren können mittels 3D-Printing (auch *Additive Fertigung* genannt) Nanokomposite Lage für Lage gefertigt werden. Zum 3D-Printing wird vor allem im biomedizinischen Bereich geforscht, wobei auf Basis natürlicher oder synthetischer Polymere und unter Einsatz sogenannter Photoinitiatoren (PI) künstliches Gewebe oder künstliche Organe gedruckt werden könnten.⁴¹ In diesem Zusammenhang wird auch an nanopartikulären PI geforscht. So können beispielsweise photokatalytische **Halbleiter-Metall-Nanostäbe (CdSe/CdS-Au)** als PI für das 3D-Printing verwendet werden.⁴² Während des 3D-Drucks haben die PI die Funktion, die Photopolymerisation von photosensitiven Monomeren und Oligomeren auszulösen.⁴³ Durch diese Technik entstehen sogenannte Photopolymere, wie Methacrylat-basierende Harze, um technische oder medizinische Bauteile (z. B. Spezialwerkzeuge oder -düsen) maßgeschneidert herzustellen. Gemeinsam mit **keramischen Nanofasern** (Zirkonium-, Silizium- und/oder Yttrium-basiert), werden Photopolymere auch für die Herstellung von Zahnfüllungen verwendet.⁴⁴

Organische Nano-Additive

Zur Erhöhung der Festigkeit werden Kunststoffen häufig Glas- oder Kohlenstofffasern zugesetzt. Die Herstellung dieser Fasern braucht jedoch große Mengen an Energie. Naturfasern, deren Ausgangsmaterialien und Herstellung aus ökologischer Sicht als weitgehend unbedenklich gelten, rücken als Alternativen zunehmend in den Fokus.⁴⁵ Vor allem auch für die Herstellung von Bio-Polymerkompositen sind derartige organische Additive von Interesse, da sie nicht nur deren Eigenschaften verbessern, sondern auch biologisch abbaubar sind. Naturfaser-verstärkte Kunststoffe reichen jedoch noch nicht an die Qualität von Glas- oder Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffen heran. Hier sind noch einige technische Probleme zu überwinden, wie etwa die geringe Haftung der (hydrophilen) Naturfasern an (hydrophobe) Polymere. Zudem ist auch eine gleichmäßige Verteilung in der Polymermatrix außerordentlich schwierig und die Qualität der Naturfasern unterliegt größeren Schwankungen als bei synthetisch hergestellten Fasern, da Wetter- und Umwelteinflüsse direkt auf die Eigenschaften der Fasern wirken.

Nanocellulose gewinnt aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften, wie hoher Zugfestigkeit, Biokompatibilität und hohem Aspektverhältnis⁴⁶, immer mehr an Interesse, sowohl von Seiten der Forschung als auch der Industrie. Die potenziellen Anwendungsbereiche reichen von der Medizin bis zum Bauwesen. Na-

nocellulosefibrillen weisen Festigkeiten und Steifigkeiten auf, die jenen von Glasfasern überlegen sind. Sie können im sogenannten „Top-Down-Prozess“ aus verschiedenen erneuerbaren Quellen extrahiert werden, etwa aus Holz Zellstoff, Nutzpflanzen oder organischem Abfall. Fibrillendurchmesser von bis zu 2 nm sind hierbei möglich, wobei die Länge einige Mikrometer beträgt. Auch Bakterien können aus Zucker Cellulose-Makromoleküle aufbauen und diese als Schutzfilm einsetzen. Dieser besteht aus hochreiner Nanocellulose mit einem Anteil an kristallinen Strukturen von bis zu 90 % und Fibrillendurchmessern von 10 bis 100 nm und einer Länge von einigen Mikrometern.⁴⁵ Nanocellulose hat das Potenzial erdölbasiertes Material für die Herstellung von Folien, Beschichtungen oder Verpackungen zu ersetzen. Das Material stellt nach derzeitigem Kenntnisstand keine Gefahr für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt dar.⁴⁷

Lignocellulose ist der Bestandteil der Zellwände von verholzten Pflanzenteilen und dient als Strukturgerüst. Das Material besteht zu 40-80 % aus Cellulose, 5-25 % Lignin und 10-40 % Hemicellulose. Holz- und Strohabfälle stehen weltweit in großen Mengen zur Verfügung und werden derzeit hauptsächlich zur Energiegewinnung genutzt.⁴⁸ Auch Lignin lässt sich in Bioraffinerieanlagen daraus gewinnen um **Lignin-Nanopartikel** herzustellen. Diese sind Gegenstand der Forschung für die verschiedensten Anwendungsgebiete. Lignin zeigt einige herausragende Eigenschaften, wie hohe Beständigkeit gegen Fäulnis, UV-Absorption, hohe Steifheit und die Fähigkeit Oxidationsprozesse zu verlangsamen oder zu verhindern. Eingearbeitet etwa in Biokunststoffe kann Nanolignin die Festigkeit des Kunststoffes erhöhen. Erste Forschungsergebnisse zeigen auch, dass sich dieses Material als UV-Schutz oder aufgrund seiner bioziden Eigenschaften als Kunststoffadditiv eignen würde.⁴⁸

Derzeitige Anwendungen in der Praxis

Im Rahmen des Projekts „NanoAdd“⁴⁹ wurde eine Online-Marktrecherche durchgeführt, um herauszufinden, welche Konsumprodukte aus Nanokompositen am österreichischen Markt erhältlich sind. Da Hersteller nicht verpflichtet sind, die Zusammensetzung der von ihnen eingesetzten Kunststoffe zu deklarieren, war es nur möglich, solche Produkte zu eruieren, bei denen Hersteller oder Händler freiwillig Angaben über ein verwendetes Nano-Additiv machen.

Die Untersuchung ergab, dass im Bereich Konsumgüter ausschließlich bei einigen wenigen Sportartikeln und Sportgeräten damit geworben wird, dass Nanokompositmaterialien verwendet

werden. Bei den eingesetzten Nano-Additiven handelt es sich um Graphen und CNTs, also kohlenstoffbasierte Additive, die in diesem Zusammenhang zur Herstellung von leichten und strapazierfähigeren Produkten Verwendung finden, wie z. B. Fahrradreifen, -rahmen und -helme oder auch Sportschuhe und Badmintonrackets

Unternehmensbefragungen

Neben der Online-Marktrecherche wurde 2019 auch eine qualitative Datenerhebung bei zehn österreichischen Unternehmen (Compoundierer, Verarbeiter, Forschung und Entwicklung) durchgeführt. Dabei wurde erhoben, ob und in welchem Ausmaß nanoskalige Additive in Kunststoffteilen eingesetzt werden. Hierbei lag der Fokus auf der Automobil- und Elektro-/Elektronikbranche. Zudem wurden Trends und erwartete zukünftige Entwicklungen beim Einsatz von Nano-Additiven in diesen Bereichen abgefragt.

Im Gegensatz zur wissenschaftlichen Literatur, wo die Verwendbarkeit von Nano-Additiven in verschiedensten Produkten aus der Automobil- sowie Elektro-/Elektronikbranche im Labormaßstab getestet wird, werden aktuell in der Praxis nur sehr wenige bis gar keine Nanomaterialien in diesen Bereichen verwendet. In den betrachteten Sektoren wird hauptsächlich Carbon Black als schwarzer Farbstoff eingesetzt. Carbon Black wird jedoch von den Verarbeitern nicht als Nanofüllstoff gesehen, da meist gröberes, mikroskaliges Carbon Black zur Anwendung kommt. Ultrafeines bzw. nanoskaliges Carbon Black wird derzeit nur für Spezialfolierungen eingesetzt. Des Weiteren werden Titandioxid-Partikel als weiße Pigmentstoffe verwendet. Hier ist jedoch unklar, ob die eingesetzten Additive nanoskalige Größenordnungen aufweisen, da die Partikel bereits im zugekauften Masterbatch⁵⁰ enthalten sind. Zudem werden bereits vereinzelt halogenhaltige Flammenschutzmittel durch „Nano-Ton“ (in Kombination mit anderen Synergisten) ersetzt. Generell kommt laut den befragten Personen der Großteil aller Nano-Additive derzeit im Bereich von Oberflächenbeschichtungen und Lacken zur Anwendung (z. B. Nano-TiO₂ als photokatalytische Beschichtung).

Im Bereich der angewandten Forschung und Entwicklung werden bereits vermehrt nanoskalige Additive im Automobilssektor sowie in den Bereichen Elektrotechnik und Elektronik erprobt. Beispiele hierfür sind etwa CNTs zur Modifizierung von elektrischen Leitfähigkeiten, nanoskalige Glaszusätze als Ersatz von asbestähnlichen Inhaltsstoffen in selbstschmierenden Lagern oder Graphen/-derivate im Bereich der Nano-Elektronik. Seitens der KundInnen wird zurzeit von der Forschung fast ausschließlich eine verbesserte Funktionalität von Produkten nachgefragt. Laut den befragten Unternehmen spielt Nachhaltig-

keit hierbei eher eine untergeordnete Rolle, denn diese habe beim Vertrieb von langlebigen Produkten kein Alleinstellungsmerkmal.

Die Gründe, warum Nanomaterialien in den untersuchten Sektoren nur in geringem Ausmaß eingesetzt werden, sind bei allen Befragten sehr ähnlich: Herausforderungen hinsichtlich der Dispergierbarkeit und Herstellung der Nanokomposite in größerem Maßstab (außerhalb vom Labor), ein zu hohes Preisniveau sowie ein ungewisser Einfluss auf Mensch und Umwelt. Werden diese Hemmnisse überwunden, ist ein Einsatz von Nano-Additiven für einige der befragten Personen in Zukunft vorstellbar. Manche Unternehmen erwarten sich einen zukünftigen Mehrwert von Nano-Additiven durch verbesserte Eigenschaften wie beispielsweise Temperaturstabilität, Kratzfestigkeit, Prozessvereinfachung (einstufiger Prozess) oder verringertes Gewicht – insbesondere im Auto- und Flugzeugbau. Daraus resultierende Materialeinsparungen und Prozessvereinfachungen hätten zusätzlich positive Nebeneffekte für die Umwelt. Generell ist seitens der Befragten ein vermehrter Einsatz von Nano-Additiven in naher Zukunft jedoch nicht absehbar.

Mit Hinblick auf das Recycling und damit einhergehenden Kumulationseffekten wird erwartet, dass zukünftig eher weniger Additive (sowohl Nano-Additive als auch konventionelle Additive)

in Kunststoffen eingesetzt werden. Darüber hinaus wurde von mehreren befragten Unternehmen der Wunsch nach einer generellen Vereinheitlichung und Verringerung der Anzahl verschiedener Kunststoffbestandteile geäußert. Als Startpunkt hierfür werden spezifische Regulierungen im Bereich von Flammenschutzmitteln, welche beispielsweise in der E-Mobilität eine wichtige Rolle spielen, gesehen. In weiterer Folge sollten allgemeine Richtlinien für das Recycling von Kunststoffen geschaffen werden.

Anmerkungen und Literaturhinweise

- Maier R.D. & Schiller M. (2016): Handbuch Kunststoff Additive. 4., vollständig neu bearbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag, München.
- Xanthos M. (2010): Functional Fillers for Plastics. By Marino Xanthos (Ed.). WILEY-VCH Verlag.
- Rallini M. & Kenny J.M. (2017): Nanofillers in Polymers. In: Modifications of Polymer Properties. Elsevier. 47-86.
- Greßler S. & Gazsó A. (2016): Oberflächenmodifizierte Nanopartikel – Teil I: Arten der Modifikation, Herstellung, Verwendung. *NanoTrust-Dossier Nr. 046*, Mai 2016.
- Siehe dazu: Greßler S., Part F., Gazsó A. & Huber-Humer M. (2017): Nanotechnologische Anwendungen für Lebensmittelkontaktmaterialien. *NanoTrust-Dossier Nr. 049*, November 2017.
- Langner R., Kohlhoff J., Grüne M. & Reschke St. (2015): Schichtsilikat-Polymer-Nanokomposite. Werkstoffe in der Fertigung. HW-Verlag. <https://werkstoffzeitschrift.de/schichtsilikat-polymer-nanokomposite/>. Zugriff 20.8.19.
- How Toyota brought nanocomposite materials to the world. Dezember 2014. <https://blog.toyota.co.uk/toyota-brought-nanocomposite-materials-world>. Zugriff 21.8.19.
- Lloyd M.S. & Lave L.B. (2003): Life Cycle Economic and Environmental Implications of Using Nanocomposites in Automobiles. *Environ. Sci. Technol.* 37, 3458-3466.
- Pielichowski K. & Michalowski S. (2014): Nanostructured flame retardants: performance, toxicity, and environmental impact. *Health and Environmental Safety of Nanomaterials*. Polymer Nanocomposites and other Materials containing Nanoparticles. 251-277. Woodhead Publishing.
- Hessen-Nanotech (2009): Nanotechnologie in Kunststoff. Innovationsmotor für Kunststoffe, ihre Verarbeitung und Anwendung. Band 15 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. https://www.technologieland-hessen.de/mm/NanoKunststoff_Nanotechnologie_Kunststoff_Innovationsmotor_Verarbeitung_Anwendung.pdf.
- Bergeret A. (2011): Environmental-Friendly Biodegradable Polymers and Composites. *Integrated Waste Management*, Vol. I. Kap. 18, 341-364. Sunil Kumar (Ed.). In Tech.

- 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.
- DaNa – Informationen zu Nanomaterialien und Nano-Sicherheitsforschung. Industrieruß (Carbon Black) – Materialinfo. <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/industrieruss/materialinfo-industrieruss>. Zugriff 22.8.19.
- Paul D.R. & Robeson L.M. (2008): Polymer nanotechnology: Nanocomposites. *Polymer* 49 (15), 3187-3204. 10.1016/j.polymer.2008.04.017.
- Environment Canada, Health Canada (2013): Carbon Black: Screening Assessment for the Challenge. Environment Canada; Health Canada. https://www.ec.gc.ca/ese-ees/2CF34283-CD2B-4362-A5D6-AD439495D0D1/F SAR_B12%20-%201333-86-4%20%28Carbon%20Black%29_EN.pdf. Zugriff 5.1.19.
- Kocher B., Brose S., Feix J., Görg C., Peters A. & Schenker K. (2010): Stoffeinträge in den Straßenraumbereich – Reifenabrieb. BAST-Bericht V 188. Bundesanstalt für Straßenwesen. https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-v/2010-2009/v188.html
- 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, 10.1039/C6EN00094K.
- Foitzik M.-J., Unrau H.-J., Gauterin F., Dörnhöfer J. & Koch T. (2018): Investigation of ultra fine particulate matter emission of rubber tires. *Wear* 394-395, 87-95. 10.1016/j.wear.2017.09.023.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich: Statusbericht 2019. <https://www.bmnt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/bundes-abfallwirtschaftsplan/BAWP2017-Final.html>. Zugriff 2.8.19.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2017): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017, Teil 2. <https://www.bmnt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/bundes-abfallwirtschaftsplan/BAWP2017-Final.html>. Zugriff 11.5.19.
- Duncan T.V. (2015): Release of engineered nanomaterials from polymer nanocomposites: the effect of matrix degradation. *ACS applied materials & interfaces* 7 (1), 20-39.
- Mülsener Rohstoff- und Handelsgesellschaft mbH, s.a. Anwendungen von Gummimehlen und Gummigranulaten in Industrie, Chemie, Bau, Freizeit. Sport. <https://www.mrh-muelsen.de/mrh-gummimehle-gummigranulate-altreifenrecycling.html>. Zugriff 2.8.19.
- OECD (2014), Nanotechnology and Tyres: Greening Industry and Transport, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264209152-en>.
- Greßler S., Fries R. & Simkó M. (2011): Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon Nanotubes) – Teil I: Grundlagen, Herstellung, Anwendung. *NanoTrust Dossiers, Nr. 22*, März 2011.

Fazit

Für die Herstellung von Polymer-Nanokompositen beschäftigt sich die Forschung bereits seit längerem mit dem Einsatz unterschiedlichster Nano-Additive. Nano-Additive weisen besondere Eigenschaften auf, welche die mechanischen, elektrisch leitfähigen, bioziden, flamm-schützenden oder Barriere-Eigenschaften verbessern. Durch ihren Einsatz können sowohl positive Umwelteffekte (z. B. durch Gewichts-einsparung und dadurch bedingte Ressourcenschonung), als auch negative Auswirkungen (z. B. Umweltrisiken durch Freisetzung) resultieren. Für einen breitflächigen Einsatz sind jedoch noch einige technische Hindernisse zu überwinden. Zudem sind die Marktpreise vieler Nano-Additive noch zu hoch. Ebenso gilt es, eine solide wissenschaftliche Grundlage zu schaffen, damit Gesundheits- und Umweltrisiken am besten schon im Vorhinein im Zuge einer fundierten Risikoabschätzung ausreichend bewertet werden können und dadurch ein sicherer Einsatz dieser Materialien gewährleistet werden kann.

- ²⁵ DaNa – Informationen zu Nanomaterialien und Nano-Sicherheitsforschung. Graphen – Materialinfo. <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/graphen/materialinfo-graphen>. Zugriff 22.8.19.
- ²⁶ Brandt H. (2017): Kohlenstoffbasierte Nanokomposite für Strukturanwendungen. Europäische Sicherheit und Technik. Juli 2017. Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen berichtet über neue Technologien. 76. <https://www.int.fraunhofer.de/content/dam/int/de/documents/EST/EST-0717-Kohlenstoffbasierte-Nanokomposite-fuer-Strukturanwendungen.pdf>. Zugriff 22.8.19.
- ²⁷ Chen Y., Gao J., Yan Q., Hou X., Shu Sh., Wu M., Jian N., Li X., Xu J.-B., Lin Ch.-T. & Yu J. (2018): Advances in graphene-based polymer composites with high thermal conductivity. *Veruscript Functional Nanomaterials*, 2, #OOSB06.
- ²⁸ Weitere Anwendungsmöglichkeiten von Graphen siehe unter: <https://graphene-flagship.eu/material/GrapheneApplicationAreas/Pages/default.aspx>.
- ²⁹ Fries R., Greßler S. & Simkó M. (2011): Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon Nanotubes) – Teil II: Risiken und Regulierung. *NanoTrust Dossiers*, Nr. 24, Mai 2011.
- ³⁰ Nowack B., David R.M., Fissan H., Morris H., Shatkin J.A., Stintz M., Zepp R. & Brouwer D. (2013): Potential release scenarios for carbon nanotubes used in composites. *Environmental International* 59, 1-11.
- ³¹ Greßler S., & Nentwich M. (2011): Nano und Umwelt – Teil II: Gefährdungspotenziale und Risiken. *Nano Trust Dossiers*, Nr. 27, November 2011.
- ³² Kotsilkov S., Ivanov E. & Vitanov N.K. (2018): Release of Graphene and Carbon Nanotubes from Biodegradable Poly(Lactic Acid) Films during Degradation and Combustion: Risk Associated with the End-of-Life of Nanocomposites Food Packaging Materials. *Materials* 11, 2346.
- ³³ Greßler S., & Nentwich M. (2011): Nano und Umwelt – Teil I: Entlastungspotenziale und Nachhaltigkeitseffekte. *Nano Trust Dossiers*, Nr. 26, November 2011.
- ³⁴ Salieri B., Turner D.A., Nowack B. & Hischer R. (2018): Life cycle assessment of manufactured nanomaterials: Where are we? *NanoImpact*, Volume 10, April 2018, Pages 108-120.
- ³⁵ Part F., Berge N., Baran P., Stringfellow A., Sun W., Bartelt-Hunt S., Mitrano D., Li L., Hennebert P., Quicker P., Bolyard S.C. & Huber-Humer M. (2018): A review of the fate of engineered nanomaterials in municipal solid waste streams. *Waste Management* 75, 427-449, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.012>.
- ³⁶ Fries R. & Simkó M. (2012): Nano-Titandioxid Teil I – Grundlagen, Herstellung, Anwendung. *Nano Trust Dossier*, Nr. 33, September 2012.
- ³⁷ RICHTLINIE 2003/11/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 6. Februar 2003 zur 24. Änderung der Richtlinie 76/769/EWG des Rates über Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen (Pentabromdiphenylether, Octabromdiphenylether).
- ³⁸ Fries R., Greßler S., Simkó M., Gzásó A., Fiedeler U. & Nentwich M. (2009): Nanosilber. <http://NanoTrustDossiers.Nr.10pdf>, April 2009.
- ³⁹ Kamyshny A. & Magdassi S. (2019): Conductive nanomaterials for 2D and 3D printed flexible electronics. *Chem. Soc. Rev.*, 2019, 48, 171. DOI: 10.1039/c8cs00738a.
- ⁴⁰ IDTechEx Ltd (2019): Flexible, Printed and Organic Electronics 2019-2029: Forecasts, Players & Opportunities. <https://www.idtechex.com/en/research-report/flexible-printed-and-organic-electronics-2019-2029-forecasts-players-and-opportunities/639>.
- ⁴¹ Murphy S.V. & Atala A. (2014): 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology* 32, 773, 10.1038/nbt.2958.
- ⁴² Waiskopf N., Ben-Shahar Y., Banin U. (2018): Photocatalytic Hybrid Semiconductor-Metal Nanoparticles; from Synergistic Properties to Emerging Applications. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.) 30, e1706697, 10.1002/adma.201706697.
- ⁴³ Peer G., Dorfinger P., Koch T., Stampfl J., Gorsche C. & Liska, R. (2018): Photopolymerization of Cyclopolymerizable Monomers and Their Application in Hot Lithography. *Macromolecules* 51, 9344-9353, 10.1021/acs.macromol.8b01991.
- ⁴⁴ Li X., Liu W., Sun L., Aifantis K.E., Yu B., Fan Y., Feng Q., Cui F. & Watari, F. (2014): Resin Composites Reinforced by Nanoscaled Fibers or Tubes for Dental Regeneration. *BioMed Research International* 2014, 13, 10.1155/2014/542958.
- ⁴⁵ Mautner A. (2016): Green Materials – Nanocellulose. *Polymer. Plus Lucis* 1/2016, 45-48. <https://www.univie.ac.at/pluslucis/PlusLucis/161/S45.pdf>.
- ⁴⁶ Die Fasern weisen im Verhältnis zur ihrer Länge einen sehr geringen Durchmesser auf.
- ⁴⁷ Stoudmann N., Nowack B. & Som C. (2019): Prospective environment risk assessment of nanocellulose for Europe. *Environ. Sci.: Nano*, 2019, 6, 2520-2531. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2019/en/c9en00472f>.
- ⁴⁸ Beisl St., Friedl A. & Miltner A. (2017): Lignin from Micro- to Nanosize: Applications. *Int. J. Mol. Sci.* 18. https://www.vt.tuwien.ac.at/fileadmin/tvt/TVT/Bio-refinery/IntJMolSci_2017_18_2367_reduziert.pdf
- ⁴⁹ NanoAdd – Die Bedeutung von funktionellen Füllstoffen und nanoskaligen Additiven für Kunststoff in der Kreislaufwirtschaft. FFG-Projekt 867865 unter Leitung der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Abfallwirtschaft. Gefördert durch die FFG im Rahmen des Nano-EHS-Programms (Nano Environmental Health and Safety). <https://projekte.fgg.at/projekt/3060046>.
- ⁵⁰ Unter dem Begriff Masterbatch versteht man Kunststoffadditive in Form von Granulaten mit Gehalten an Farbstoffen und/oder Additiven, die höher sind als in der Endanwendung. Sie werden dem Kunststoff (Rohpolymer) zum Einfärben bzw. zur Veränderung der Eigenschaften beigemischt. Masterbatches erhöhen dabei im Vergleich zu Pasten, Pulver oder flüssigen Zusatzstoffen die Prozesssicherheit und sind sehr gut zu verarbeiten. <https://www.chemie.de/lexikon/Masterbatch.html>. Zugriff 5.9.19.

IMPRESSUM

Medieninhaber: Österreichische Akademie der Wissenschaften; Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 31/2018); Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

Herausgeber: Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA); Apostelgasse 23, A-1030 Wien; www.oeww.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.oeww“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt: epub.oeww.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/

NanoTrust-Dossier Nr. 052, November 2019:
epub.oeww.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier052.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