

NANO CYCLE

Nanomaterialien und Advanced Materials in einer Kreislaufwirtschaft und
Auswirkungen auf Recyclingprozesse

Inhalt

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	8
2 Nanomaterialhaltige Abfallströme	12
2.1 Definition von Nanomaterialien und Advanced Materials im Rahmen des Projektes.	12
2.1.1 Abfallströme - Auswahl	14
2.1.2 Potenzielle MNM-haltige Abfallströme	15
2.1.3 Ausgewählte Abfallströme	31
3 Nanomaterialien Einsatzmengen	34
3.1 Nanomaterialien-Mengen	34
3.2 Aufkommen und Behandlung von Verpackungskunststoffen und PET-Flaschen.....	36
3.2.1 Nanomaterialien in PET Flaschen	38
3.2.2 Nanomaterialien in Verpackungskunststoffen	40
4 Konsequenzen für Gesetzgebung	41
4.1 Gesetzliche Randbedingungen.....	41
5 MNM im Recyclingprozess	46
5.1 Einführung zu Kunststoffen.....	46
5.1.1 Kunststoffsorten	47
5.1.2 Zusatzstoffe (Additive)	49
5.2 Verwertung von Kunststoffen	52
5.2.1 Werkstoffliche Verwertung („Mechanisches Recycling“)	54
5.2.2 Rohstoffliche Verwertung („Chemisches Recycling“)	57
5.2.3 Thermische Verwertung (energetische Nutzung)	58
5.3 Recycling von PET Flaschen	59
5.4 Recycling von Kunststoffverpackungsfolien	62
5.5 Nanomaterialien im Recyclingprozess.....	65
5.5.1 Problembewusstsein für Nanomaterialien in Recyclingprozessen	65
5.5.2 Nachweis von MNM (Vorprüfungen / Vortests)	67

5.5.3 Auswirkungen von MNM auf den Recyclingprozess	69
5.5.4 Recyclerbarkeit von Kunststoffen mit MNM.....	76
5.5.5 Rückführbarkeit von MNM.....	77
5.5.6 Exposition während Recyclingprozess und Auswirkungen von MNM auf den ArbeitnehmerInnenschutz.....	79
5.6 Verbesserungsmöglichkeiten für den Recyclingprozess von MNM.....	82
5.7 Ausblick.....	85
6 Exposition von MNM in einer Kreislaufwirtschaft	88
6.1 Allgemeine Informationen über mögliche Risiken von MNM in der Kreislaufwirtschaft für Mensch und Umwelt	88
6.1.1 Allgemeine Risiken von MNM für die Umwelt	88
6.1.2 Exposition gegenüber MNM in der Abfall- und Recyclingwirtschaft	89
6.1.3 Potenzielle Emissionsquellen von MNM im Stoffkreislauf	90
6.1.4 Aufnahmewege etwaiger Emissionen in den menschlichen Körper und in die Umwelt.....	91
6.2 Gefährlichkeit und Expositionspotenziale von MNM bei der Kreislaufführung von PET- Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien.....	92
6.2.1 Wissensstand zu Gefährlichkeit der eingesetzten MNM für Mensch und Umwelt	92
6.2.2 Abschätzung der Expositionspotenziale.....	95
6.3 Bewusstsein der Stakeholder zum Thema MNM	109
6.4 Weitere Handlungsfelder und Forschungsbedarf.....	109
7 Prüfmethode für MNM im Recyclingprozess	112
7.1 Allgemeine Betrachtung zu Prüfmethode für NMN/AM.....	112
7.1.1 Prüf- und analytische Methoden für NMN.....	113
7.1.2 Prüf- und analytische Methoden für NMN in PET-Flaschen und Kunststofffolien	114
7.1.3 Partikuläre oder ionische Freisetzung	123
8 Kooperation von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung	127
8.1 Sensibilisierung und Konsultation bei Sicherheitsfragen.....	129
8.1.1 Tools und Instrumente.....	129

8.1.2 Nationale Kontaktstelle (Schweiz)	131
8.2 Geförderte Forschungsprojekte	132
8.2.1 Sicherheitsforschung als (integraler) Bestandteil von Materialforschungsprojekten	132
8.2.2 Sicherheitsforschung in eigenem Forschungsprojekt (Nanosicherheitsforschung)	134
8.2.3 Vernetzung während der Projektlaufzeit.....	135
8.3 Diskussion möglicher Kooperationsformate im Kontext österreichischer F&E Förderung	136
8.3.1 Erfolgsfaktoren und Barrieren.....	136
8.3.2 Optionen der Zusammenarbeit	138
8.3.3 Zielgruppen und Zielvorschlag für eine nutzbringende Kooperation entlang des Lebenszyklus von Nanomaterialien	141
9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	144
Tabellenverzeichnis.....	156
Abbildungsverzeichnis	157
Literaturverzeichnis	158
Abkürzungen.....	169
Impressum	173

Zusammenfassung

Manufactured Nano Materials (MNM) können die Eigenschaften der Polymermatrix von Kunststoffen verbessern: z.B. Barrierewirkung für Gase, Färbung, UV-Schutz, Gewichtsverringerung, Materialeinsparung, Verstärkung der thermischen und mechanischen Stabilität. Für PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien sind beispielsweise folgende MNM in der EU als Lebensmittelkontaktmaterialien in Kunststoffen zugelassen: Titanitrid (TiN) (nur als „re-heat Additiv für PET-Flaschen), Nanotone (Montmorillonitlehm, Kaolin), Siliciumdioxid (SiO₂), Carbon Black und Zinkoxid (ZnO). MNM werden entweder als Überzüge (Coatings innen und außen) auf die Kunststoffe aufgebracht oder in der Polymermatrix dispergiert.

In Österreich wurden 2013 rund 30.000 t PET-Flaschen und rund 69.000 t Verpackungsfolien (<1,5 m²) über die Getrenntsammlung erfasst, wovon knapp 20.500 t bzw. 12.300 t Regranulat erzeugt wurden. Im Jahr 2015 wurden ca. 18.000 t PET-Flaschen und 32.000 t Kunststofffolien für das Recycling aus dem Ausland importiert, was zu MNM Einträgen in die heimische Abfallwirtschaft von PET-Flaschen und Verpackungsfolien führen kann. Diese importierten Abfälle können MNM enthalten, die in Österreich in der Produktion trotz erlaubten Einsatzes nicht eingesetzt werden, in der EU (für bestimmte Anwendungen) nicht zugelassen sind, oder höhere Konzentrationen als in der EU zugelassen aufweisen. Welche Mengen an MNM in den genannten Altkunststoffen in Österreich tatsächlich enthalten sind, ist nicht bekannt. Für TiN in PET-Flaschen wird geschätzt, dass max. 1.000 kg/Jahr in den Recyclingprozess gelangen.

Kunststoffverpackungsfolien (z.B. aus Polyethylen, Polypropylen) und PET-Flaschen (aus Polyethylenterephthalat) können mindestens 3-5 Mal recycelt werden. Durch Zugabe von spezifischen (auch nanoskaligen) Zusatzstoffen (Additiven) während des Recyclingverfahrens können mehr Lebenszyklen erreicht werden. PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien werden in Österreich ausschließlich werkstofflich, d.h. thermisch-mechanisch, recycelt.

Recyclingbetriebe haben keine Information darüber, ob und in welchen Mengen MNM in den von ihnen verarbeiteten Kunststoff-Fraktionen enthalten sind. Es gibt einerseits keine Kennzeichnungspflicht für MNM in Kunststoffen, und andererseits geben weder Inverkehrbringer noch Entsorger Information zu möglichen MNM den Recyclern bekannt. Vortests an den Kunststoff-Fraktionen in den Recyclingbetrieben zielen nicht auf MNM ab. Bisher haben Recycler keine Auswirkungen von MNM auf das Recyclingverfahren oder die Recyclate wahrgenommen. Etwaige Verfärbungen der Recyclate werden auf

Kunststoffmischungen oder andere Verunreinigungen der Kunststoffschmelze zurückgeführt.

Grundsätzlich ist jeder Zusatzstoff, unabhängig davon ob er nanoskalig ist oder nicht, ein mehr oder weniger großer Störstoff für das Recycling von Kunststoffpolymeren. Wissenschaftliche Studien zeigen, dass MNM durch das Recyclingverfahren Eigenschaften des Recyclats wie z.B. Reißfestigkeit und Zugfestigkeit beeinträchtigen, die Polymerkettenspaltung beeinflussen, zu Geruchsbildung führen, das Auftreten von Kavitationen fördern und zu Verfärbungen (Vergilbung) und verringerter Transparenz der Recyclate führen können. Nanoskalige Beschichtungen / Färbungen können auch die Detektion bei der Vorseparation in Sortieranlagen stören. Inwiefern die Auswirkungen von MNM die Qualität des Recyclats beeinträchtigen, hängt einerseits davon ab, für welche Anwendung das Recyclat vorgesehen ist und andererseits davon, ob durch Zusatz von (nanoskaligen) Additiven während des Recyclingverfahrens die aufgetretenen Wirkungen kompensiert werden können. In Hinblick auf Nanofüllstoffe wird als positiv erachtet, dass sie im Vergleich zu klassischen Füllstoffen in weit geringeren Mengen ihre Wirkung entfalten und daher die Polymermatrix weniger stark „verunreinigen“. Der Zusatz von (nanoskaligem) Carbon Black und TiO_2 verbessert die Farbqualität von schwarzem bzw. weißem Recyclat. Nano- SiO_2 Beschichtungen, die z.B. bei PET-Flaschen zur Verbesserung der Gasdichtigkeit eingesetzt werden, und im Recyclingprozess mit Laugen abgelöst werden können, stören im Gegensatz zu den vielfach für Saftflaschen verwendeten Multilayer-, Blend- oder Scavenger-Additiven die Recyclingfähigkeit nicht. Insgesamt beurteilen Recycler Verunreinigungen durch Fremdkunststoffe, Farbstoffe, makroskopische Anhaftungen und Biokunststoffe als schwerwiegendere Störstoffe als MNM. Derzeit sehen sie keine unmittelbare Notwendigkeit, die Recyclingverfahren in Hinblick auf MNM im Abfallstrom prozess- oder verfahrenstechnisch anzupassen.

Nanoskalige Zusatzstoffe von Kunststoffen können derzeit beim werkstofflichen Recycling technisch weder als Substanz noch als Partikel rückgeführt werden. Bei einer geschlossenen Kreislaufführung können die meist produktspezifisch eingesetzten MNM aber in der Matrix gehalten und als Recyclat wieder in der gleichen Anwendungsgruppe eingesetzt werden.

Der aktuelle Wissensstand zur Exposition gegenüber von MNM in der Abfall- und Recyclingwirtschaft ist begrenzt. Für österreichische Abfallbehandlungsanlagen fehlen Messwerte zur Exposition. Potentielle Emissionsquellen im Stoffkreislauf von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien sind: Stäube, Auswaschungen, Dämpfe, Emissionen bei der Dekontamination und Übergang in verpackte Lebensmittel. Es ist jedoch davon auszugehen, dass MNM nicht oder nur in sehr geringen Mengen freigesetzt werden. Derzeit gibt es kaum

Hinweise auf Gefahren für Mensch und Umwelt durch Exposition gegenüber MNM, Risiken sind jedoch nicht gänzlich auszuschließen (Vorsorgeprinzip).

Für die Österreichische Abfallgesetzgebung besteht in Hinblick auf eine mögliche Exposition von MNM bei jetzigem Wissensstand kein Handlungsbedarf für das Recycling von PET-Flaschen und Verpackungsfolien.

Derzeit existieren keine standardisierten Methoden zur Identifizierung und Quantifizierung der ausgewählten MNM in den Kunststoffmatrices von PET oder Polyethylen. In der Literatur sind Methoden beschrieben, die sich auf das Problemfeld anwenden oder zumindest dafür adaptieren lassen. Die Identifizierung/Quantifizierung stellt sich für die anorganischen, nicht-kohlenstoffbasierten MNM in der Polymermatrix (Produkt, Recyclat) und den Migrationssimulantien am einfachsten dar (z.B. durch Röntgenfluoreszenzanalytik, Röntgendiffraktometrie und Infrarotspektrometrie). Kohlenstoffbasierte MNM wie Carbon Black oder CNTs können mit differentieller Thermogravimetrie bestimmt werden. In Abluft, Umgebungsluft, Spül- und Abwasser ist die Bestimmung von freigesetzten MNM erschwert. Es muss davon ausgegangen werden, dass die meisten MNM im Aerosol/Schwebstoff noch in die Kunststoffmatrix eingebunden sind und die Konzentration freier MNM daher als sehr niedrig einzuschätzen ist.

Erfolgsfaktoren für eine Kooperation von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung liegen im Vertrauen und wechselseitigen Verständnis, der Unabhängigkeit beider Forschungsbereiche, sowie einer Nutzerorientierung. Dabei können Verbände und Netzwerke als Partner auftreten. Kooperationsbarrieren werden hingegen in einem gewissen wechselseitigen Desinteresse, einer Abgrenzung und einem „interdisziplinären Mismatch“ geortet. Derzeit gibt es auch mangelnde Kooperationsanreize für SicherheitsforscherInnen, v.a. an Universitäten.

Um die Kooperation von Sicherheits- und Innovationsforschung zu verbessern, könnten folgende Optionen umgesetzt werden (entweder einzeln oder in Kombination):
Obligatorischer Austausch zwischen MaterialentwicklerInnen und SicherheitsexpertInnen während der Laufzeit von geförderten Material F&E-Projekten, Begleitforschung für geförderte Material F&E-Projekte sowie unabhängige nationale Kontaktstellen zu Nanomaterialentwicklungsfragen. Die Kooperation von Innovationsforschung und Sicherheitsforschung erfordert jedenfalls den Aufbau eines ExpertInnenpools von unabhängiger Stelle und in Zusammenarbeit mit MultiplikatorInnen.

1 Einleitung

In den letzten Jahren wurden immer mehr synthetische Nanomaterialien (manufactured nano materials, MNM) und „Advanced Materials“ (AM) in Produkten verwendet und fallen folglich auch in größeren Mengen als Abfall an. Was mit diesen Nanomaterialien am Ende des Lebenszyklus passiert und wie sie sich im Rahmen der Kreislaufwirtschaft verhalten, ist weitgehend unbekannt. Erschwerend kommt hinzu, dass es für nanomaterialhaltige Konsum- und Verbrauchsgüter in vielen Fällen keine Kennzeichnungspflicht gibt und sie daher vor der Verwertung (Recycling) bzw. vor der Entsorgung nicht getrennt gesammelt werden können.

MNM und AM können in einer großen Produktpalette eingesetzt werden. Eine Untersuchung, welche Nanomaterialien in Österreichischen Betrieben in welchen Produkten eingesetzt werden, wurde etwa im FFG-geförderten Projekt NanoProdEx¹ durchgeführt. Verpackungen werden bis 2020 das Hauptanwendungsgebiet für Nanomaterialien sein. Derzeit werden schon größere Mengen von getrennt gesammeltem Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyethylenterephthalat (PET), Kunststoffe die Nanomaterialien enthalten können, recycelt. Untersuchungen belegen, dass beim Recycling durch enthaltenen Nanomaterialien Farbänderungen und geringfügige Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der recycelten Kunststoffe auftreten können (Sánchez et al. 2014).

Quantitative Angaben, welche Materialien in welchen Mengen eingesetzt werden, liegen jedoch auf allen Ebenen (weltweit, EU-weit, Österreichweit) nur in Einzelfällen vor. Im gegenständlichen Projekt sollen MNM und AM **in ausgewählten Abfallströmen** in einer Kreislaufwirtschaft quantifiziert werden. Ein analytischer Nachweis von MNM und AM in Abfallströmen ist aufwändig und es liegen nur teilweise geeignete Analysemethoden vor. Folglich sind auch die Mengen an MNM und AM in diversen Abfallströmen weitgehend unbekannt. Zur Abschätzung der Mengen in Abfallströmen sind deshalb Ansätze, die über die Analyse von Produkten oder Abfällen hinausgehen, notwendig.

Studien zeigen, dass in vielen Abfallströmen, die **recycelt** werden, Nanomaterialien enthalten sind, in manchen Fällen sogar solche, von denen gesundheitliche Risiken ausgehen (Struwe et al. 2012). Abfallwirtschaftliche Prozesse, Abfallbehandlungen und Recyclingprozesse können zur Freisetzung von MNM führen (Part et al. 2015a). Es ist daher möglich, dass Recyclingprozesse nanomaterialhaltiger Abfälle spezifische Vorsorgemaßnahmen zum Gesundheitsschutz der Beschäftigten in Recyclingunternehmen notwendig machen (Struwe et al. 2012). Kaum untersucht ist bis dato, welche Auswirkungen Abfallströme, die MNM oder AM-

¹ Vergl. <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/chemikalien/nanotechnologie/nanoprojekte/nanoprodex/> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

haltige Materialien beinhalten, im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft auf Recyclingprozesse und letztlich auf das erzeugte Recyclat haben.

In Hinblick auf **Expositionspotenziale** gibt es Abschätzungen für mehrere Expositionsszenarien für die Herstellung und die Produktion nanomaterialhaltiger Produkte oder für die Anwendung nanomaterialhaltiger Produkte. Expositionsszenarien im Bereich des Recyclings von Abfällen gibt es bislang nur sehr wenige.

Prüfmethoden für MNM und AM (im Recyclingprozess) können zum einen instrumentelle, analytische Messmethoden zur Bestimmung von Materialeigenschaften sein, und ebenso Methoden zur Ermittlung von Materialmengen (z.B. Massen-/Volumen-, Oberflächen- oder Anzahlkonzentration) in bestimmten Matrices oder zur Ermittlung der Herkunft des MNM und AM (Identifikation). Zum anderen werden Prüfmethoden zur Bestimmung des Gefährdungspotenzials und zur Risikoabschätzung verwendet (z.B. OECD test guidelines²). Im Recyclingprozess werden Prüfmethoden hauptsächlich zur Quantifizierung von MNM in den angelieferten Abfällen, in der Umgebungsluft (Arbeitsschutz), in der Abluft, Abwasser und Abfallprodukten, sowie dem Recyclat benötigt. Muss eine Risikoabschätzung vorgenommen werden, weil die MNM und AM, die im Recycling-Prozess erwartet werden ein relevantes toxisches Potenzial haben, müssen Prüfmethoden zur Verfügung stehen, die die MNM und AM von natürlichen und technischen Partikeln ähnlicher Art und Zusammensetzung unterscheiden können. Wichtig für die Auswahl oder Entwicklung einer Methode ist, ob ein MNM spezifisch detektiert werden muss, oder ob die Anzahl- oder Massenkonzentration von Partikeln einer bestimmten Größenklasse (ohne Unterscheidung zwischen den Partikelarten oder -form) bereits ausreicht. Ein Beispiel wäre, ob die Konzentration von SiO₂-Nanopartikeln in der Atemluft gemessen werden soll, oder ganz allgemein, die Menge an Partikeln kleiner 0,1 µm (PM_{0,1}). Generell muss zwischen den MNM und der Matrix in der sie vorkommen ein Kontrast, bspw. eine unterschiedliche Materialzusammensetzung oder eine andere Eigenschaft, existieren. Dieser Kontrast kann eine unterschiedliche Materialzusammensetzung oder eine andere Eigenschaft sein, die eine Detektion ermöglichen. Prüfmethoden werden im Allgemeinen für Gesamtpartikelzahl in einer Größenklasse oder spezifisch für ein MNM und eine Matrix entwickelt. Solange die Kombination MNM/Matrix nicht bekannt ist, lässt sich nur schwer eine Aussage darüber treffen mit welcher Methode diese Messung erfolgreich durchgeführt werden kann.

Für die Entsorgung von MNM und AM gibt es in Österreich (und in der EU) bisher keine spezifischen **rechtlichen Regelungen**. Derzeit hängt die Behandlung eines Abfallstroms von der Art des Abfalls ab (Schmiermittel, Elektrogeräte, etc.), unabhängig, ob oder welche Nanomaterialien in welchen Mengen enthalten sind. Das Bekenntnis zum Vorsorgeprinzip (§ 1

² Vergl. <http://www.oecd.org/chemicalsafety/testing/oecdguidelinesforthetestingofchemicals.htm> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

(1, 2, 4, 5) AWG 2002) ermöglicht aber im Bedarfsfall indirekt nanospezifische Regelungen trotz unzureichendem Wissensstand.

Das Projekt NANO CYCLE strebt in Hinblick auf zwei ausgewählte nanomaterialhaltige Abfallströme (PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien) folgende Ziele an:

- Identifikation und Auswahl nanomaterialhaltiger Abfallströme und Beschreibung der relevanten Freisetzungspfade von MNM und AM (Stoffstrombetrachtung)
- Quantifizierung von MNM und AM in Abfallströmen, die recycelt werden (in Hinblick auf die ausgewählten Abfallströme)
- Auswirkungen von MNM und AM auf den Recyclingprozess (produkt- und anlagenbezogen)
- Exposition von MNM und AM in einer Kreislaufwirtschaft
- Handlungsbedarfe für Analyse- und Prüfmethode für das Recycling von MNM /AM
- Konsequenzen der Projektergebnisse für das Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002)
- Potenziale und Perspektiven für nutzbringende Kooperation von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung in Zusammenhang mit MNM und AM

Während Nanomaterialien gemäß diverser Definitionen und gemäß Empfehlung der EU2011/696/EU über ihre Dimension (z.B. zumindest in einer Dimension zwischen 1 - 100 nm) definiert sind gibt es für AM keine Definition, die deren Größe berücksichtigt. Vielmehr werden/können AM über ihre Materialeigenschaften definiert, die über jene traditioneller Materialien, die seit Jahrzehnten oder Jahrhunderten verwendet werden, hinausgehen. Basierend auf ihren „neuartigen“ Eigenschaften und Anwendungsgebieten, können von diesen noch nicht berücksichtigte Risiken ausgehen. Einige MNM können unter Umständen als AM betrachtet werden, während einige AM keine MNM sein müssen und größerskalig als diese sind.

Im Rahmen des Projektes werden MNM als Nanomaterialien im Sinne der EU Empfehlung betrachtet, die aber einschränkend vom Menschen bewusst, also synthetisch, hergestellt wurden. Damit entfallen natürlich vorkommende Nanomaterialien und Nanomaterialien, die unbeabsichtigt vom Menschen hergestellt wurden. Aufgrund der Neuartigkeit von MNM und AM für die Risikobewertung sind die Zugänge zu beiden prinzipiell ähnlich. Im Rahmen dieses Projektes wird deshalb in weiterer Folge ausschließlich der Begriff MNM verwendet.

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Stakeholder und ExpertInnen konsultiert. Ihnen gebührt unser Dank.

- Zum Verhalten von Nanomaterialien im Recyclingprozess wurden jeweils drei ExpertInnen von österreichischen Recyclingbetrieben und von Forschungseinrichtungen mit Schwerpunkt Kunststoffverpackung und Recycling (FH Campus Wien, Montanuniversität Leoben, Transfercenter für Kunststofftechnik GmbH) interviewt.
- Zur Abschätzung der Exposition von MNM wurde am 27.05.2019 ein ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop durchgeführt. Abgesehen von den Mitgliedern des Projektteams und VertreterInnen der Auftraggeber nahmen 13 TeilnehmerInnen daran teil. Diese stammten aus den Bereichen Kunststoffforschung, Verpackungshersteller, Getränkehersteller, Einzelhandel, Entsorgungsunternehmen, Recyclingbetriebe, Arbeits- und Gesundheitsschutz sowie öffentliche Verwaltung.
- Zur Abschätzung der Potenziale für eine Kooperation von Sicherheits- und Innovationsforschung wurden acht ExpertInnen aus den Ländern Deutschland, Niederlande und der Schweiz befragt (Ministry of Infrastructure and Environment (NL), Bundesministerium für Bildung und Forschung (DL), Projektträger Jülich, Neue Materialien und Chemie (NMT), Eidgenössisches Departement des Innern EDI, Bundesamt für Gesundheit BAG, Direktionsbereich Verbraucherschutz, Abteilung Chemikalien, und Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology). Zusätzlich wurde auch ein Experte aus Österreich befragt (Universität Wien, Department für Umweltgeowissenschaften).

2 Nanomaterialhaltige Abfallströme

2.1 Definition von Nanomaterialien und Advanced Materials im Rahmen des Projektes

Im Rahmen des Projektes wird die Empfehlung („Recommendation“) der EU-Kommission 2011/696/EU für eine Definition von Nanomaterial verwendet.

Laut dieser Empfehlung ist der Begriff Nanomaterial wie folgt festgelegt:

- „'Nanomaterial' ist ein natürliches, bei Prozessen anfallendes oder hergestelltes Material, das Partikel in ungebundenem Zustand, als Aggregat oder als Agglomerat enthält, und bei dem mindestens 50 % der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 nm bis 100 nm haben.“
- „'Partikel' ist ein sehr kleines Teilchen einer Substanz mit definierten physikalischen Grenzen.“
- „'Agglomerat' ist eine Ansammlung schwach gebundener Partikel oder Aggregate, in der die resultierende Oberfläche ähnlich der Summe der Oberflächen der einzelnen Bestandteile ist.“
- „'Aggregat' ist ein Partikel aus fest gebundenen oder verschmolzenen Partikeln.“
- Fullerene, Graphenfloccen und einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren mit einem oder mehreren Außenmaßen unter 1 nm sind ebenfalls als Nanomaterialien zu betrachten.

Dabei umfasst die Definition natürliche als auch technisch hergestellte Nanomaterialien. Es wird auch nicht unterschieden, ob bei einer Produktion absichtlich Nanomaterialien erzeugt werden oder zufällig anfallen. Bei gesetzlichen Regelungen ist jedoch zu beachten, falls sich diese auf „gefertigte“ („manufactured“) Materialien bezieht, dann gilt diese Einschränkung auch für Nanomaterialien.

Die EU-Definition basiert auf der ISO Definition von Nanomaterialien, wobei jedoch mehrere Änderungen gemacht wurden. So ist die EU-Definition auf Partikel eingeschränkt (wodurch nicht-partikuläre Materialien, wie etwa Proteine oder Micellen, ausgeschlossen werden), ebenso sind Nanostrukturierte Materialien mit einer internen oder oberflächlichen Struktur im Bereich von 1-100 nm, wie etwa Computerchips, nicht umfasst (MEMO/11/704).

Gemäß der EU-Definition kann in besonderen Fällen der Schwellenwert von 50 % für die Anzahlgrößenverteilung durch einen Schwellenwert zwischen 1 % und 50 % ersetzt werden, wenn Umwelt-, Gesundheits-, Sicherheits- oder Wettbewerbserwägungen dies rechtfertigen.

Dadurch kann der EU-Wert in begründeten Einzelfällen der Definition von SCENIHR angenähert werden (Schwellenwert von 0,15%).

Sofern technisch machbar und in spezifischen Rechtsvorschriften vorgeschrieben, kann die Übereinstimmung mit der Definition „Nanopartikel“ anhand des Verhältnisses von spezifischer Oberfläche/Volumen bestimmt werden. Ein Material mit einer spezifischen Oberfläche/Volumen von über $60 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ ist als der Definition von „Nanopartikel“ entsprechend anzusehen. Allerdings ist ein Material, das aufgrund seiner Anzahlgrößenverteilung ein Nanomaterial ist, auch dann als der Definition von „Nanopartikel“ entsprechend anzusehen, wenn seine spezifische Oberfläche kleiner als $60 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ ist.

Die Definition der EU Kommission zieht nur die Partikelgröße als einziges und eindeutiges Charakterisierungsmerkmal heran, spezifische, durch die nanoskalige Struktur hervorgerufene Eigenschaften werden nicht berücksichtigt. Ob ein Nanomaterial gefährlich ist, wird durch eine Risikobewertung bestimmt.

Diese Definition führt dazu, dass auch Substanzen, welche bereits seit Jahren auf dem Markt etabliert und von Behörden anerkannt sind, nunmehr als Nanomaterial gesehen werden. Ebenso könnte es Fälle geben, dass Materialien, die oberhalb der 100 nm-Grenze liegen, signifikant andere Eigenschaften aufweisen als mikroskopische Substanzen, ohne angemessene Risikoanalysen auf den Markt gelangen können.

Die Empfehlung der Kommission hat mittlerweile in einzelne EU-Regulierungen Eingang gefunden, wie etwa die Biozidverordnung (No 528/2012), die Medizinprodukteverordnung (No 2017/745) oder die Annexe der REACH Verordnung (No 1907/2006)³.

Die Empfehlung bzw. Kernelemente der Empfehlung wurden zwischenzeitlich auch in die Gesetzgebung mancher EU-Staaten, z.B. Frankreich, Dänemark, Schweden oder Belgien sowie in Norwegen übernommen.

Die wesentlichen Elemente der EU-Empfehlungen wurden in JRC 2019, das einen Überblick über Konzepte und Begriffe der EU-Definition von Nanomaterialien gibt, nochmals festgehalten.

Advanced Materials (Fortgeschrittene / Fortschrittliche Materialien)

Es gibt viele Möglichkeiten ein fortschrittliches Material zu definieren. Die umfassendste Definition bezieht sich auf alle Materialien, die (wesentliche) Fortschritte gegenüber den traditionellen Materialien darstellen, die seit Jahrzehnten oder Jahrhunderten verwendet

³ Commission Regulation EU 2018/1881 of 3 December 2018 amending Regulation (EC) No 1907/2006.

werden/wurden. In dieser Hinsicht beziehen sich fortschrittliche Materialien auf neu- und weiterentwickelte Materialien mit überlegenen Leistungen von Eigenschaften, die für die beabsichtigte Verwendung von Bedeutung sind. Was nun dabei tatsächlich ein fortgeschrittenes Material ist, ist Ermessenssache und unter Umständen situationsabhängig.

Die Ausdehnung des Begriffes Nanomaterial um den Begriff Advanced Material (AM) soll miteinschließen, dass es auch bei Nanomaterialien Entwicklungen gibt, die zu größeren Partikeln führen, die nicht mehr streng genommen in die Definition von Nanomaterialien fallen. Aufgrund ihrer „Andersartigkeit“ der Eigenschaften sollen diese aber ebenso in einer Risikobewertung wie Nanomaterialien berücksichtigt werden bzw. gelten hier dieselben Bedenken, dass von ihnen wo möglicherweise ein noch nicht eingeschätztes/einschätzbares Risiko für Mensch und Umwelt ausgeht.

2.1.1 Abfallströme - Auswahl

Nanomaterialien werden seit einigen Jahren zunehmend in unterschiedlichem Ausmaß in verschiedensten Produkten eingesetzt. Die Produktpalette reicht dabei von Autoreifen, Baumaterialien, Solarzellen, Beschichtungen oder Lacke, über Elektronikgeräte, Einsatzbereiche in Garten und Landwirtschaft, Kosmetika, Lebensmittel und -verpackungen bis hin zu Sportgeräten und Textilien. Es ist davon auszugehen, dass bei einem Großteil der Produkte dieser Produktpalette jedoch nach wie vor keine MNM eingesetzt werden.

Diese Produkte werden nach ihrer Nutzung zu Abfällen und finden sich in verschiedenen Abfallströmen wieder, welche wiederum verschiedenen Behandlungsverfahren (Recyclingprozessen, thermische Behandlung, mechanisch biologische Anlagen, etc.) zugeführt werden. Manche Produkte oder Inhaltsstoffe gelangen ins Abwasser und werden in Kläranlagen behandelt.

Obwohl seit Jahren MNM in Produkten eingesetzt werden, gibt es nur sehr wenige Abschätzungen über die in Verkehr gesetzten Mengen (etwa über die weltweite Produktion einzelner MNM oder AM). Eine weitere Aufteilung auf die in Frage kommenden Anwendungsgebiete fehlen jedoch zumeist. Über die in Österreich in Verkehr gesetzten Mengen finden sich in der Literatur nur in Einzelfällen Abschätzungen, wobei sich die Abschätzungen auf Einzelprodukte (z.B. Sonnenmilch) und nicht auf Abfallströme (z.B. Kunststoffverpackungen) beziehen.

Aufgrund der derzeitigen Datenlage sind Quantifizierungen von MNM Mengenströmen mit einem hohen Aufwand und großen Unsicherheiten verbunden.

Im Rahmen des Projektes wurden deshalb basierend auf einer Literaturrecherche letztlich zwei Abfallströme ausgesucht, die folgende Randbedingungen erfüllen sollen:

- Abfallstrom bei dem die Stoffkreisläufe größtenteils geschlossen werden. Dies sind Recyclingprozesse, z.B. Recycling von Kunststoffflaschen
- Abfallströme, bei denen nanomaterialhaltige Abfälle (vermutlich) einen relevanten Anteil am gesamten Abfallstrom aufweisen
- Die Abfallströme, die in die Recyclinganlage gelangen, sollen möglichst homogen sein (z.B. separat gesammelte Abfallströme).
- Es soll eine möglichst gute Datenlage über den Abfallstrom vorliegen (Aufkommen des Abfallstromes, Behandlungswege).

2.1.2 Potenzielle MNM-haltige Abfallströme

In diesem Kapitel werden Rechercheergebnisse für folgende neun Produkte bzw. Anwendungsbereiche dargestellt, die nach ihrer Nutzungsdauer in die Abfallwirtschaft gelangen:

- Lebensmittel
- Baumaterialien
- Papier
- Reifen
- Altfahrzeuge
- Alttextilien
- Li-Ionenakkus
- Verpackungskunststoffe
- PET-Flaschen

2.1.2.1 Lebensmittel

Gemäß Verbraucherinformations-Verordnung der EU (VO (EU) Nr. 1169/2011) müssen Lebensmittel, die technisch hergestellte Nanomaterialien enthalten, speziell gekennzeichnet werden. Seit 2014 muss auf der Verpackung des Lebensmittels, das für Verbraucher bestimmt ist, deutlich nach dem Zutatennamen das Wort "Nano" in Klammer folgen, wie z.B. "Siliziumdioxid [Nano]".

Nicht kennzeichnungspflichtig sind natürliche, zufällige oder verfahrensbedingte Nanomaterialien, die etwa beim Mahlen von Mehl oder Kaffee, bei der Homogenisierung von Fruchtsäften oder bei der Emulgierung von Fett entstehen (VZVB 2019).

„Werden Lebensmittelzusatzstoffe, -enzyme und -aromen in Form von Nanoteilchen für technologische Zwecke - wie zum Beispiel Beta-Carotin (Farbstoff) oder Siliziumdioxid SO₂ (Rieselhilfe) - in Lebensmitteln eingesetzt, fallen sie unter das Lebensmittelzusatzstoffrecht der EU ("Zusatzstoffpaket"). Hierfür gibt es vier EU-Verordnungen (VO (EG) Nr. 1331, 1332, 1333 bzw. 1334/2008). Danach dürfen nur jene Lebensmittelzusatzstoffe, -enzyme und -aromen in Verkehr gebracht werden, die zugelassen und in Positivlisten aufgeführt sind. Zu beachten ist, dass auch bereits zugelassene Zusatzstoffe, wenn sie nun in anderer als der bisher geprüften und zugelassenen Form verwendet werden sollen, beispielsweise in Nanoform, neu bewertet und gegebenenfalls neu zugelassen werden müssen, bevor sie in Verkehr gebracht werden dürfen“.⁴

Für einige Zusatzstoffe prüft die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) bis zum Jahr 2020, ob sie als Nanomaterialien eingestuft und damit gekennzeichnet werden müssten (VZVB 2019). Dies sind:

- Eisenoxide und Eisenhydroxide (E 172),
- Silber (E 174),
- Gold (E 175),
- Siliziumdioxid (E 551),
- Calciumsilicat (E 552),
- Magnesiumsilicat (E 553a) und
- Talkum (E 553b).

Für Titandioxid ist diese Prüfung bereits abgeschlossen. Es gilt nach der Definition der Europäischen Kommission nicht als „technisch hergestelltes Nanomaterial“, kann aber bis zu 3,2 Prozent zufällig entstandene Nanopartikel enthalten.

Siliziumdioxid enthält Partikel im Nanobereich, die sich zu größeren Teilchen zusammenschließen. Ob sie als Nanomaterial einzustufen sind, ist bislang unklar. Einige Anbieter von Nahrungsergänzungsmitteln geben an, Siliziumdioxid oder Kieselsäure als Nanomaterial zuzusetzen. Außerhalb des Bereichs der Nahrungsergänzungsmittel sind bislang kaum Lebensmittel mit Nano-Kennzeichnung bekannt.

Nach BUND 2015 gibt es einige Lebensmittel, die bereits Nanomaterialien enthalten können. Hierzu gehören Kochsalz, Ketchup, Schokolade, Gemüsepulver, Puderzucker, Kaffeeweißer, Kaffeepulver, Gewürzmischungen, Suppenpulver, Fleisch, Käse, Obst, Süßwaren, Backwaren, Speiseeis, Chips, Erfrischungsgetränke, Limonaden, Vitaminpräparate, Nahrungsergänzungsmittel, Speiseöl, Kaugummis, etc. Instant-Suppen, Salz und Kaffeeweißer können Partikel aus Siliziumdioxid enthalten, damit sie nicht verklumpen. Hierbei können die

⁴ <https://nanoinformation.at/bereiche/regelungen/lebensmittel.html>; [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Partikel auch in Nanogröße im Produkt vorkommen. Die Nano-Siliziumdioxidpartikel lagern sich rasch zu größeren Strukturen (Aggregaten oder Agglomeraten) zusammen (BUND 2015).

2.1.2.2 Baumaterialien

Zahlreiche Nanomaterialien (z.B. TiO_2 , SiO_2 , ZnO , Ag) werden im Baubereich eingesetzt. Anwendungsgebiete sind Anstriche, Fensterglas, behandeltes Holz, Fliesen, Fliesenkleber, Fugenmörtel, Ausgleichsmasse, Pflastersteine und viele andere (Andersen et al. 2014 und Ziegler 2010). Ziel ist es, in Bauprodukten teilweise völlig neue Materialeigenschaften zu erzielen. Dazu gehören beispielsweise Resistenzen gegen Bakterien, verbesserte Oberflächeneigenschaften wie Kratzfestigkeit oder Selbstreinigung, aber auch photokatalytische, UV-reflektierende Eigenschaften oder Hitzebeständigkeit.

Nanomaterialien kommen im Baubereich in unterschiedlichen Formen und Bindungen vor. Sie können mit organischen Bestandteilen chemisch in einer Matrix gebunden sein, als Aggregate vorliegen und durch Wasserzugabe beispielsweise in Zementstein gebunden werden, in Calciumcarbonat gebunden werden, oder eine keramische Oberfläche bilden. Teilweise können die verbesserten Eigenschaften durch die Ausbildung von Nanostrukturen auch ohne den Zusatz von Nanoteilchen erzeugt werden (BG BAU 2018).

Farben können Nanomaterialien enthalten, die die Oberflächeneigenschaften von Fassaden oder Innenwänden verbessern. Beispiele sind Silber-Nanopartikel aufgrund ihrer antimikrobiellen Eigenschaften, Siliziumdioxid-Nanopartikel oder Titandioxid (DGUV, 2018). Titandioxid weist photokatalytische Effekte auf, wodurch dieses für selbstreinigende Oberflächen eingesetzt wird. Es gibt mittlerweile viele Anwendungen, wie zum Beispiel Fassadenbeschichtungen, Pflastersteine, Dachziegel oder Glasoberflächen. Auch Innenwandfarben oder -putze sowie Wand- und Bodenfliesen werden mit dem Effekt ausgestattet, um Gerüche abzubauen (DGUV Forum 2018).

Bekanntes Beispiel für neuartige Eigenschaften ist die selbstreinigende Oberfläche durch den Lotus-Effekt, der dem Lotusblatt nachgeahmt und für Fassadenfarben und -putze genutzt wird.

In Holz kommen Nanomaterialien zum Einsatz, um das Material beispielsweise vor UV-Strahlung zu schützen, die Kratzfestigkeit zu erhöhen oder um eine antibakterielle Wirkung zu erzielen. Zum Einsatz kommen dabei Zinkoxid-, Eisenoxid-, Siliziumoxid- oder Silber-Nanopartikel (DGUV 2018). Teilweise werden Oberflächen auch beschichtet um sie wasser- und schmutzabweisend zu machen. Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich ist der Brandschutz durch brandhemmende Imprägniermittel und Beschichtungen (Luther 2008).

Typisch für das Bauwesen ist, dass die eingesetzten Produkte üblicherweise sehr langlebig sind (mehrere Jahrzehnte) und damit sehr zeitverzögert in der Abfallwirtschaft auftauchen.

Inwieweit Nanomaterialien in Bauabfällen enthalten sind, hängt vom Alter der Materialien und auch vom Material selber ab.

Die Deutsche Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft hat eine Liste mit Bau- und Reinigungsprodukten, welche Nanoteilchen enthalten, herausgebracht (BG BAU 2018).

2.1.2.3 Papier

Ein großer Abfallstrom, der recycelt wird, ist Altpapier. In der Papierindustrie gibt es schon seit über 10 Jahren marktreife Anwendungen für Nanomaterialien. Hierbei können Anwendungen hinsichtlich der Druckerfarben bzw. Pigmente, der Fasern und hinsichtlich Beschichtungen unterschieden werden (Steward et al. 2008).

Ein wichtiger Anwendungsbereich sind Pigmente in Druckfarben, in welchen das Druckverhalten sowie die Aufnahme der Farbe durch das Papier mit Hilfe von nanoskaligen Pigmenten verbessert werden soll. Laut verfügbaren Informationen enthalten die meisten Pigmente, also auch solche, die in der Papierindustrie zur Anwendung kommen, aufgrund der gewünschten Eigenschaften einen Anteil an nanoskaligen Teilchen. Einige Anwendungen, beispielsweise bestimmte Digitaldruckverfahren, verwenden ultrafeine Pigmente, welche demzufolge höhere Anteile an nanoskaligen Teilchen enthalten. Im Vergleich zu anderen Branchen (Bauindustrie, Kunststoffherstellung) spielt die Papierindustrie hinsichtlich der Masse an verwendeten Pigmenten eine untergeordnete Rolle (Sørensen et al. 2014).

Auch die Beschichtung von Papier oder anderen flexiblen Oberflächen wird schon seit längerem praktiziert und ermöglicht es, dem Papier neue Funktionseigenschaften wie z.B. Schutz gegen Chemikalien, Kratz- und Abriebfestigkeit, UV-Schutz oder Verformbarkeit zu geben (Böttcher 2001 und Mehnert et al. 2001).

Weiterentwicklung der Papierindustrie durch Nanoanwendungen ein aktives Forschungsfeld. Forschungsprojekte im Bereich der Nanoanwendungen in der Papierindustrie beschäftigen sich beispielsweise mit den Möglichkeiten zur Festigkeitssteigerung in Papier mit Hilfe von Nanokompositen aus Zellulose (Arndt et al. 2017), den Möglichkeiten zur Herstellung von hydrophoben Papieren (Kleebauer, 2015) oder der Entwicklung von neuen Füllstoffen in der Papierherstellung (Erhard et al. 2012).

Inwieweit die Nanomaterialien im Papier bzw. in Druckerfarben im Recyclingprozess eine Rolle spielen ist noch wenig erforscht. Ein Beitrag von Zhang et al. (2015) beschreibt Untersuchungen des Recyclingprozesses von Verpackungspapier welches mit PLA (Polylactic Acid) beschichtet ist und Zinkoxid Nanopartikel enthält. Etwa 90% des Nanomaterials wurden im Rahmen des Recyclingprozesses entfernt. Die verbleibenden Nanopartikel hatten keinen negativen Einfluss auf die recycelten Fasern. Laut Steward et al. (2008) stehen aber im Bereich der Druckerfarben

mit Nanoteilchen die verbesserten Druckeigenschaften teilweise in Konflikt mit dem Deinking im Recyclingprozess.

Beim Papierrecycling werden die Farben in einem Deinkingprozess abgetrennt. Die Deinkingschlämme werden thermisch behandelt, ein Teil der Deinkingreststoffe wird auch stofflich wiederverwertet.

2.1.2.4 Reifen

Die Reifenindustrie hat ein großes Interesse an Nanomaterialien, da die Anzahl an Fahrzeugen rasch ansteigt und eine Abdeckung des Reifenbedarfs mit der derzeitigen Technologie nicht gewährleistet werden kann (Peters 2012).

1950 gab es rund 50 Mio. Fahrzeuge weltweit, 2009 ca. 800 Mio. und nach Expertenschätzungen 2030 rund 1,6 Mrd. Fahrzeuge. Weltweit wurden im Jahr 2008 ca. 1,11 Mrd. Fahrzeugreifen hergestellt (Peters 2012).

Autoreifen müssen insbesondere 3 Schlüsselkriterien erfüllen (OECD 2014):

- Rollwiderstand: 10% Verringerung des Rollwiderstandes bedeutet eine Verringerung des Treibstoffverbrauchs um 1,5 bis 2% für Pkws (International Council on Clean Transportation 2012)
- Widerstand gegen Abnutzung: Die Abnutzung des Profils beeinflusst die Nutzungsdauer des Reifens, damit die notwendige Tauschfrequenz und damit den Materialverbrauch in der Produktion
- Griff bei nassen Bedingungen (Nasshaftung, Traktion)

Die Entwicklung zielt auf eine weitere Reduzierung des Rollwiderstandes, auf eine Verlängerung der Nutzungsdauer und auf eine Reduktion des Reifengewichtes.

Ein durchschnittlicher Autoreifen besteht zu 65% aus Gummi (inkl. Füllstoffen) und zu 25% aus Stahlgewebe. Die restlichen 10% entfallen auf die Karkasse (Textilkord).

In Autoreifen werden in großem Ausmaß Carbon Black und HD-Silica (hochdisperses Siliziumdioxid) als Füllmaterial eingesetzt. In jüngster Zeit werden zunehmend auch HD-HS Silica (highly dispersible high surface area) sowie Nanoclay (Montmorillonite) eingesetzt (OECD 2014).

Das am häufigsten verwendete Füllmaterial ist Carbon Black. Carbon Black wird seit 1910 in Autoreifen eingesetzt. Dadurch stieg die Haltbarkeit um das 40-ig fache (Peters 2012).

Carbon Black wird durch eine kontrollierte unvollständige Verbrennung des Ausgangsmaterials erzeugt. Die elementaren Partikel sind nicht stabil und aggregieren und agglomerieren innerhalb von Sekundenbruchteilen (Peters 2012).

Bei der Verwendung von Carbon Black werden 30 bis 40% Füllstoffe benötigt. Carbon Black verringert die Laufflächenabnutzung und erhöht die Bodenhaftung (Traktion). Der hohe Füllstoffanteil führt jedoch zu höherem Rollwiderstand und höherem Gewicht (OECD 2014).

Um den Rollwiderstand zu senken wird bei Pkws seit ca. 25 Jahren HD-Silizium eingesetzt. Der Rollwiderstand verursacht rund 20 % des Treibstoffverbrauchs eines Pkws und rund 30% eines Lkws (Peters 2012). HD Silizium (HD highly dispersible) wird durch Schmelzen von Sand erzeugt, bei dem Natriumsilikat abgeschieden wird.

Durch die Zugabe von HD-Silizium kann der Rollwiderstand um 20% und mehr gesenkt werden und gleichzeitig der Gripp um bis zu 12% erhöht werden sowie der Bremsweg um 10% reduziert werden (Europäisches Parlament 2008).

HD-Silizium kann bei LKW Reifen, da diese zumeist natürlichen Gummi verwenden, sowie in E-SBR-Reifen nicht eingesetzt werden (E-SBR: Emulsion Styrol Butadien Rubber) (OECD 2014 S. 22). SBR ist der am meisten hergestellte Synthetikgummi. Rund 50% der Reifen werden aus unterschiedlichen SBR-Typen hergestellt. Neben der Emulsionspolimerisation (E-SBR) gibt es auch den Herstellungsprozess der Lösungspolimerisation S-SBR (Solution Styrol Butadien Rubber), die bei Winterreifen angewandt wird. Der E-SBR Prozess ist weiter verbreitet.⁵

HD-HS Silizium (highly dispersible high surface area) erhöht die Abriebfestigkeit noch stärker als HD-Silizium und kann auch für Lkw-Reifen und E-SBR-Reifen eingesetzt werden. HD-HS-Silizium neigt weniger zu Agglomeration als HD-Silizium. HD-HS Silizium wird seit 2009 von wenigen Firmen gehandelt und dringt seither auf den Markt (OECD 2014).

Neuerdings wird teilweise auch Nanoclay eingesetzt. Nanoclay (hauptsächlich wird Montmorillonit verwendet) besteht aus Plättchen (ca. 1 nm dick), die typische Oberflächendicke beträgt jedoch 300-600 nm. Durch die Nanoclay-Schicht verlängert sich der Weg der Luft durch den Gummi, wodurch der Luftverlust aus dem Reifen verringert wird. Eine konservative Schätzung geht davon aus, dass der Luftverlust verglichen mit konventionellen Innen-Linern um zumindest 30% reduziert werden kann. Bezogen auf Carbon Black verbessert Nanoclay die Abriebfestigkeit und den Rollwiderstand um ein paar Prozent („a few percent“) (OECD 2014).

In Struwe et al. (2012) wird auch der Einsatz von Nano-Zinkoxid (nano-ZnO) erwähnt. Dieses kann als Katalysator als Zusatz bei der Vulkanisation von Kautschuk verwendet werden, da es

⁵ Styrene-butadiene; <https://en.wikipedia.org/wiki/Styrene-butadiene> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

eine rund zehnmal größere Oberfläche hat als konventionelles Zinkoxid und je größer die Oberfläche, desto schneller läuft der chemische Prozess ab.

In der Reifenindustrie werden beim Einsatz von Carbon Black und Silizium keine Nanopartikel verwendet. Beim Mischen entstehen jedoch aus den Agglomeraten Aggregate in Nano-größe, die mit dem Gummi chemisch gebunden werden (Peters 2012).

2.1.2.5 Altfahrzeuge

Im Automobil finden sich Nanomaterialien in vielfältigen Anwendungen, z. B. als Bestandteile der Karosserie, des Motors, der Reifen, der elektrischen und elektronischen Bauteile sowie der im Fahrzeug eingesetzten Flüssigkeiten (Zimmermann et al. 2018).

Katalysatoren, Kraftstoffadditive enthalten MNM, ebenso können Textilien MNM enthalten.

Carbon Black verändert elektrostatische Eigenschaften von Kunststoffteilen.

Zunehmend werden für die Motorzuluftfiltration von Nutzfahrzeugen und in Luftfiltern für den Innenraum von Pkws nanofaserbeschichtete Medien eingesetzt (Neumann et al. 2018).

Bei Altfahrzeugen können nach Struwe et al. (2012) Nanomaterialien sowohl in Abdeckhauben/Gehäuse & Innenraumverkleidungen als auch als Metalllackierungen angewendet werden. In der erstgenannten Anwendung werden dabei Nanomaterialien in Form von mit Nano-Silikaten verstärkte Polymerkomposite eingesetzt.

Nach der Behandlung in einem Shredder wird die sogenannte Shredder-Leichtfraktion („Fluff“) einer energetischen Verwertung oder einer Post-Shredder-Anlage, in der noch weitere verwertbare Materialien abgetrennt werden, zugeführt. Teilweise wird die Kunststofffraktion aus Alttautos auch als Reduktionsmittel im Hochofenprozess zum Ersatz für Kohle und Schweröl verwertet.

Die allenfalls mit nanomaterialhaltigen Anstrichen/Beschichtungen versehenen Altmalmetalle (verschiedenste Nanomaterialien z.B. in Metall-Lack, Abgasanlage, Radaufhängung) werden recycelt.

Für die Metallbeschichtungen werden Keramik-Nanopartikel in Lacken (als Beimischungen z.B. TiO_2 , SiO_2 , Al-Oxide, Kohlenstoff-, ZnO- oder Silber-Nanopartikel) verwendet.

Bei Oberflächenbeschichtungen und in Lacken soll amorphes SiO_2 hauptsächlich die Härte und Kratzfestigkeit der Oberflächen erhöhen. Zwar besitzt SiO_2 eine geringere Härte als das alternativ eingesetzte Aluminiumoxid, die Transparenz von Klarlacken mit Nano- SiO_2 ist jedoch deutlich besser.⁶

⁶ Siliziumdioxid Materialinfo <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/siliziumdioxid/materialinfo-siliziumdioxid> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Seit Ende 2003 setzt die Automobilbranche kratzfeste Autolacke serienmäßig mit nanoskaligen Keramikpartikeln ein (Ziegler, 2010).

2.1.2.6 Alttextilien

In der Textilindustrie werden für unterschiedliche Funktionen Nanomaterialien eingesetzt. Derartige Funktionen sind (basierend auf einer Literaturliste in UBA 2013): elektrisch leitend/antistatisch, erhöhte Strapazierfähigkeit, antimikrobiell, selbstreinigend/schmutz- und wasserabweisend, feuchtigkeitsabsorbierend, verbesserte Färbbarkeit, UV-Schutz, Schutz vor Ausbleichen, Feuerfestigkeit, kontrollierte Abgabe von aktiven Wirkstoffen, Arzneimitteln oder Duftstoffen, Wärmeleitend oder –isolierend, Abschirmung elektromagnetischer Strahlen (IR-/Mikro-/ Radiowellen), Abriebbeständigkeit.

Nach Som et al. (2010) sind die bisher und in naher Zukunft am häufigsten in Textilien eingesetzten Nanomaterialien Silber, Siliziumdioxid, Titandioxid, Zinkoxid, Aluminium(hydr)oxide, Schichtsilikate (v.a. Montmorillonit), Kohlenstoffnanoröhrchen, Carbon Black, in zweiter Priorität Kupfer, Gold, Eisen(hydr)oxide, Polypyrrol und Polyanilin.

Die gewünschte Funktion der Textilien kann durch das Einbringen von synthetischen Nanomaterialien oder durch Nanostrukturierung erreicht werden. Bei der Verwendung von Nanomaterialien beim Herstellungs- und Veredelungsprozess werden diese in das Faservolumen eingebracht oder als Beschichtung auf das Textil aufgebracht (Som et al. 2010).

Nach einer Literaturliste in UBA 2013 verlieren konventionelle Textilien in der Gebrauchsphase zwischen 5 und 20% ihres Gewichts (durch Waschen, Sonneneinstrahlung, mechanischen Abrieb, etc.). Es ist deshalb davon auszugehen, dass bei Textilien, in die Nanomaterialien integriert oder aufgebracht werden, diese frei oder gebunden in die Umwelt gelangen. Die Freisetzung beim Waschen variiert zwischen annähernd Null und fast 100 %.

2.1.2.7 Li-Ionenakkus

Li-Ionen-Akkus bestehen aus Elektrolyt, Anode, Kathode und dazwischen ein Separator. Bei wiederaufladbaren Batterien (Akkumulatoren) arbeitet dieselbe Elektrode entweder als Anode oder Kathode, je nachdem, ob der Akkumulator geladen oder entladen wird.

Die Elektroden setzen sich jeweils aus einem Stromableiter und einem darauf aufgetragenen Aktivmaterial zusammen. Zwischen den Elektroden befinden sich zum einen der ionenleitende Elektrolyt, der als Vermittler der Vorgänge in der Zelle wirkt, und der Separator, der die elektronische Trennung der Elektroden gewährleistet (Rahimzei et al. 2015).

Die negative Elektrode (beim Entladen: Anode; beim Laden: Kathode) der Zelle besteht aus einer Kupferfolie und einer Schicht aus Graphit oder lithiumlegiertem Material. Die positive Elektrode (Anode) besteht aus Mischoxiden, die auf einem Aluminiumkollektor aufgebracht sind. Übergangsmetalloxide mit Cobalt, Mangan oder Nickel sind dabei die gängigsten Verbindungen. Die aufgebrachte Oxidschicht dient bei der Ladung der Zelle als Lithiumquelle (Rahimzei et al. 2015).

Nach UBA 2014 wird als Kathodenmaterial vorrangig Lithiumkobaltoxid (LiCoO_2) verwendet. Zunehmend werden jedoch neue Materialien wie Nanomaterialien aus Phosphaten von Übergangsmetallen (LiXPO_4 mit $X = \text{Mn, Fe, Co}$ oder Ni) eingesetzt; besonders bevorzugt sind Lithiummanganphosphat, Lithiumkobaltphosphat und Lithiumeisenphosphat. Durch den Einsatz in ihrer nanopartikulären Form kann die Menge des Einsatzmaterials verringert, durch eine Nanostrukturierung der Kathode deren Oberfläche vergrößert werden, was zu einer verbesserten Energiespeicherung und Stabilität der Ladezyklen führt.

Nach UBA 2014 sind neben dem typischerweise eingesetzten Graphit auch Ruß, dotierter Kohlenstoff und Fullereene geeignete Materialien.

Darüber hinaus sind sowohl nanostrukturierte Materialien (Nanodrähte, Nanostäbe, Nanoröhren und nanoporöse Partikel) als auch Nanokomposite (z.B. Kohlenstoffmatrix mit nanoskaligem Silizium oder Zinn) in Anwendung oder in der Entwicklung (Seitz et al. 2013).

Separatoren ermöglichen den freien Fluss der Ionen zwischen den Elektroden und schützen die Batterie vor einem inneren Kurzschluss und Überhitzung. Der Separator besteht aus einem Vlies aus ungewebten, nicht elektrisch leitfähigen Polymerfasern, das ein- oder beidseitig mit einem ionenleitenden anorganischen Material beschichtet ist. Vorzugsweise werden die Vliese aus Nanofasern der verwendeten Polymere gefertigt (nach UBA 2014).

Auch bei anderen Akku-Typen, die derzeit intensiv erforscht werden, wie etwa die Lithium-Luft-Batterien oder Lithium-Schwefel-Batterien sind Nanomaterialien wesentliche Bestandteile.

2.1.2.8 Verpackungskunststoffe

Hauptzweck von Verpackungen ist es, das verpackte Produkt frisch zu halten und/oder vor Beschädigung bei Transport und Lagerung zu schützen. Reine Kunststoff-Polymere reichen jedoch zumeist nicht aus, um die genannten Anforderungen an die Lebensmittelverpackung in vollem Umfang zu erfüllen. Verpackungen beeinflussen den Austausch von Feuchtigkeit, Gasen, Gerüchen oder die Färbung und können dadurch auch die „Regallebenszeit“ (shelf-life) verlängern.

Nach Wyser et al. (2016) bieten Kunststoffmaterialien eine Barriere entweder für Sauerstoff (oder andere Gase) oder Wasserdampf, aber nur selten für beides. Vielfach sind diese transparent, was ein Vorteil sein kann, aber auch zu einem lichtinduzierten Abbau führen kann.

Die Anwendung von Nanotechnologie bei Verpackungen zielt darauf ab, die Barrierewirkung zu verbessern und/oder die mechanischen und funktionellen Eigenschaften zu verändern. Nach Wyser et al. (2016) können durch Nanotechnologie mechanische Eigenschaften wie die Flexibilität, die Dauerhaftigkeit, die Temperatur- und Feuchtigkeitsstabilität, etc. verbessert werden (z.B. in Polyamiden, Polyolefin, Polystyrol, Polyurethan, Epoxidharzen, PET).

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).

Eine andere Möglichkeit die Materialeigenschaften zu verbessern, sind Mischungen von Polymeren mit verschiedenen Eigenschaften.

Für die Anwendung von Nanomaterialien bei Verpackungen gibt es im Wesentlichen zwei Routen: die Aufbringung von Überzügen (Coatings) oder die Dispergierung von Nano-Objekten in der Polymermatrix.

EU-weit zugelassene Lebensmittelkontaktmaterialien in Kunststoffen

In der EU wurden die letzten Jahre einige Nanomaterialien als Lebensmittelkontaktmaterialien in Kunststoffen zugelassen:

In der EU VO 10/2011 wurden folgende Nanomaterialien zugelassen:

- nanoskaliges Titannitrid (Nano-TiN) ausschließlich zur Verwendung bei PET-Flaschen bis zu 20 mg/kg
Primärpartikel mit einer Größe von etwa 20 nm. Im PET Agglomerate mit einem Durchmesser von 100-500 nm, bestehend aus Titannitrid-Nanopartikeln.
- Kohlenstoffschwarz (Carbon Black) Primärpartikel von 10-300 nm, aggregiert zu 100-1200 nm, die Agglomerate von 300 nm-mm bilden können;
Toluollösliche Substanzen: maximal 0,1 %, bestimmt nach ISO-Methode 6209.
UV-Absorption von Cyclohexanextrakt bei 386 nm: < 0,02 AU für eine Zelle von 1 cm oder < 0,1 AU für eine Zelle von 5 cm, bestimmt mit einer allgemein anerkannten Analysemethode
Benzo(a)pyrengehalt: max. 0,25 mg/kg Kohlenstoffschwarz.
Höchstwert für die Verwendung von Kohlenstoffschwarz im Polymer: 2,5 Gew.-%

- Siliziumdioxid: Bei synthetischem amorphem Siliziumdioxid: Primärpartikel von 1-100 nm, aggregiert zu 0,1-1 µm, die Agglomerate von 0,3 µm bis Millimetergröße bilden können

In der EU VO 174/2015 wurden folgende Nanomaterialien zugelassen:

- Copolymer von Butadien, Ethylacrylat, Methylmethacrylat und Styrol, vernetzt mit Divinylbenzol, in Nanoform
 - Copolymer von Butadien, Ethylacrylat, Methylmethacrylat und Styrol, nicht vernetzt, in Nanoform
 - Copolymer von Butadien, Ethylacrylat, Methylmethacrylat und Styrol, vernetzt mit 1,3-Butandioldimethacrylat, in Nanoform
- Für diese drei Substanzen gelten folgende Einschränkungen: Nur zur Verwendung als Partikel mit einem Gewichtsanteil von nicht mehr als 10 % w/w in nicht weichgemachtem PVC in Kontakt mit allen Lebensmittelarten nicht über Raumtemperatur, auch bei langfristiger Aufbewahrung. Bei Verwendung mit dem Stoff mit der FCM-Stoff- Nr. 859 und/oder dem Stoff mit der FCM-Stoff-Nr. 998 gilt die Beschränkung von 10 Gew.-% für die Summe dieser Stoffe. Der Partikeldurchmesser muss größer als 20 nm und bei mindestens 95 % größer als 40 nm sein.
- Kaolin: Partikel sind nur in einer Stärke von weniger als 100 nm zulässig, wenn sie mit einem Anteil bis zu 12 % w/w in die aus Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH) bestehende innere Schicht einer mehrschichtigen Struktur eingearbeitet sind, wobei die Schicht in direktem Kontakt mit dem Lebensmittel als funktionelle Barriere die Migration von Partikeln in das Lebensmittel verhindert.

In der EU VO 1416/2016 wurden folgende Nanomaterialien zugelassen:

- Zinkoxid, Nanopartikel, beschichtet mit [3- (Methacryloxy) propyl]trimethoxysilan (FCM- Stoff-Nr. 788) Nur zur Verwendung in weichmacherfreien Polymeren. Die Beschränkungen und Spezifikationen für den Stoff mit der FCM-Stoff-Nr. 788 sind einzuhalten.
Zinkoxid, Nanopartikel, unbeschichtet;
Nur zur Verwendung in weichmacherfreien Polymeren.

In der EU VO 752/2017 wurden folgende Nanomaterialien zugelassen:

- (Methacrylsäure, Ethylacrylat, N- Butylacrylat, Methylmethacrylat und Butadien)-Copolymer in Nanoform
Nur zur Verwendung a) mit einem Massenanteil von bis zu 10 % in weichmacherfreiem PVC; b) mit einem Massenanteil von bis zu 15 % in weichmacherfreier PLA. Das fertige Material ist bei höchstens Raumtemperatur zu verwenden.

- Montmorillonitlehm, modifiziert durch Dimethyldialkyl (C16-C18)-ammoniumchlorid; nur zur Verwendung mit einem Massenanteil von bis zu 12 % in Polyolefinen in Kontakt mit trockenen Lebensmitteln, denen in Tabelle 2 des Anhangs III das Simulanz E zugeordnet ist, und bei höchstens Raumtemperatur. Die Summe der spezifischen Migration von 1-Chlorhexadecan und 1-Chloroctadecan darf 0,05 mg/kg Lebensmittel nicht überschreiten. Kann Plättchen in Nanoform enthalten, die nur in einer Dimension dünner als 100 nm sind. Solche Plättchen müssen parallel zur Polymeroberfläche ausgerichtet und vollständig in das Polymer integriert sein.

In einer Literaturzusammenstellung in UBA 2018 werden folgende Einsatzgebiete von Nanomaterialien in Verpackungen genannt:

- nano-TiN: Einsatz als Kunststoffadditiv in PET-Flaschen, um deren thermische und mechanische Eigenschaften zu verbessern (EFSA Journal 2012)
- Kaolin und Montmorillonitlehm: Verbesserung der Barriereigenschaften von Kunststoffen (EFSA Journal 2014b 2015)
- Carbon Black: als Schwarzpigment aber auch als UV- Schutz (EFSA Journal 2015)
- nano-ZnO: als UV- Schutz (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)

Nach Störmer et al. (2017) (bzw. in darin zitierter Literatur) werden Tonminerale hauptsächlich genutzt, um die Polymermatrix in Hinblick auf die thermische und mechanische Stabilität zu verstärken sowie um die Barrierewirkung für Gas und Dampf zu verbessern. Das am häufigsten genutzte Tonmineral ist Montmorillonit. Polymermaterialien, die mit Nanoclay modifiziert wurden, sind bspw. mehrschichtige Verpackungsfolien. Nach DaNa⁷ sind Folien eine der Hauptanwendungen von Nanoclay.

Nach Störmer et al. (2017) (bzw. in darin zitierter Literatur) wird Carbon Black für die Farbgebung, für die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit und für die Verbesserung der Festigkeit des Polymers in Kunststoffverpackungen verwendet. Synthetisches amorphes SiO₂ wird als Füllmaterial für verschiedene Polymere eingesetzt. Dabei können u.a. die thermischen und mechanischen Eigenschaften, der Lichtschutz, die Verarbeitbarkeit, die Abriebfestigkeit verbessert werden und auch die Farbe verändert werden.

⁷ DaNa: Informationen zu Nanomaterialien und Nano-Sicherheitsforschung
<https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/wissens-datenbank#anwendung=anwendung/56&material=material/31>
 [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Nano-Zinkoxid wird bereits auf Grund seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften als UV-Absorber mit hoher Transparenz im sichtbaren (VIS)-Bereich allein oder in Verbindung mit organischen Lichtschutzmitteln in dünnen Lebensmittelverpackungsfolien verwendet. Es weist eine hohe Durchlässigkeit im sichtbaren und NIR-Bereich auf (Caro 2007).

Nanosilber wird teilweise in Verpackungsmaterialien eingesetzt (SCENIHR 2013).

Nach Eberle 2010 spielen Lebensmittelverpackungen mit Nanokomponenten bereits eine bedeutende Rolle auf dem Schweizer Markt, wobei Nanomaterialien (Al, Al₂O₃, SiO_x) in Verbundfolien wegen ihrer optimierten Sperreigenschaften gegenüber O₂, H₂O und Aromen eingesetzt werden.

Nach Möller et al. (2009) wurden auf dem Schweizer Markt Verbundfolien zur Verbesserung der Sperreigenschaften gegenüber Sauerstoff, Wasserdampf und Aromastoffen (v.a. für Snacks, Chips, Süß- und Backwaren) mit nanotechnologisch optimierten Barriereigenschaften bereits verwendet.

Nach Bumbudsanpharoke & Choi (2015) bzw. darin zitierter Literatur werden verschiedene Nanomaterialien in Lebensmittelverpackungen als funktionelle Additive, wie Silbernanopartikel, Nanoclay, Zinkoxid, Titandioxid oder Kohlenstoffnanoröhrchen oder Stärkekristalle eingesetzt. Nanoclay war dabei das erste Material auf dem Markt (seit Beginn der 90iger Jahre) und ist das am weitesten verbreitete Nanomaterial in Verpackungsmaterialien. TiO₂ wird als Pigment und Beschichtungsadditiv in Lebensmittelverpackungen eingesetzt.

Nach Jopp (2006) wird TiO₂ als UV-Schutz auch für Lebensmittel-Folien eingesetzt.

Nach VCI 2018 stellt die chemische Industrie derzeit u.a. Metalloxide und Metalle als Nanomaterial her, die zum Beispiel in Gummimischungen, Kunststoffen, Kompositmaterialien, Beschichtungen und Folien eingesetzt werden.

Nach UBA 2018 bzw. darin zitierter Literatur wird am Einsatz anderer Nanomaterialien in PET-Flaschen, Frischhalteboxen, Verpackungsfolien und Blisterverpackungen (wie nanoskaligem Silber, Nano-Ton, Nanozellulose, Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT), Graphen, Halloysite-Nanotubes (HNT), nanoskaliges Kupferoxid (Nano-CuO) und nanoskaliges Magnesium (Nano-MgO), geforscht, teilweise befinden sie sich bereits in Verpackungen für medizinische Produkte, Pflege,- oder Hygieneprodukte.

Durch den Einsatz von Nanomaterialien können auch „aktive“ und „intelligente“ Verpackungen realisiert werden. „Aktive Verpackungen“ sind solche, bei denen die Verpackung selbst Stoffe abgibt, die die Haltbarkeit der verpackten Produkte erhöhen. Ein Beispiel dafür wären

Silbernanopartikel, die sich relativ einfach in verschiedene Kunststoffe (PE, PP, LDPE) einarbeiten lassen. Antimikrobielle Verpackungen im Lebensmittelbereich sind vor allem in Asien und den USA verbreitet (in der EU ist Silber nicht als Lebensmittelkontaktmaterialien zugelassen). In „intelligenten Verpackungen“ hingegen wird Nanotechnologie als Sensor eingesetzt („Nanosensoren“), welche innerhalb oder außerhalb der Verpackung angebracht den Zustand des Lebensmittels überwachen soll (z.B. ein Temperatursensor, der Auskunft gibt, ob die Kühlkette durchgehend eingehalten wurde).

Nach UBA 2018 stehen den Vorteilen von Nanomaterialien in Verpackungen, wie Gewichtsverringerung und Materialeinsparung mögliche Nachteile wie die Anreicherung von Nanomaterialien im Rezyklat, aber auch der möglichen Freisetzung von Nanomaterialien durch sach- oder unsachgemäße Entsorgung der Verpackung entgegen.

„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“ (UBA 2018, basierend auf Sanchez et al. 2014).

2.1.2.9 PET-Flaschen

In PET-Flaschen können die Nanomaterialien nanoskaliges Titannitrid (Nano-TiN), ZnO, Nanoton, amorpher Kohlenstoff oder Siliziumdioxid enthalten sein. Diverse Einsatzgebiete dieser MNM wurden bereits im Kapitel „Verpackungskunststoffe“ beschrieben.

In PET-Flaschen ohne Barriereigenschaften dringt Sauerstoff von außen ein und CO₂ geht verloren. Für kohlenensäurehaltige Getränke oder für Säfte sind deshalb die Barriereigenschaften besonders relevant.

Für Silica-Beschichtungen wurden nach Plastverarbeiter 2002 bis 2001 drei Verfahren entwickelt. 1999 wurde das Actis (Amorphous Carbon Treatment on Internal Surface) Verfahren des französischen Herstellers von PET-Blasformmaschinen Sidel vorgestellt, bei dem eine Innenbeschichtung mit amorphem Kohlenstoff erfolgt. Ebenfalls 1999 kam Tetra Pak mit der „Glaskin“-Technologie auf den Markt, bei der eine kristallklare, dünne Schicht aus Siliciumoxid (SiO_x) auf die Innenseite fertig geblasener PET-Flaschen aufgetragen wird. Parallel stellte die Krones AG, das gemeinsam mit Coca-Cola und dem Beschichtungsspezialisten Applied Films,

Hanau, entwickelte Verfahren Best-PET vor, eine Außenbeschichtung mit einer hauchdünnen Silikathaut. Daraus wurde Best-PET Plus, weil die Beschichtung um einen zweiten „Top Coat“ ergänzt wurde. Die erste Anlage wurde bei Coca-Cola West-Zentra Erfrischungsgetränke in Dorsten installiert, weitere wurden von dem Brausehersteller in Auftrag gegeben (Plastverarbeiter 2002).

Das deutsche Unternehmen KHS (KHS 2019), Hersteller von Abfüll- und Verpackungsanlagen für die Getränke-, Food- und Non-Food-Industrie, bietet das InnoPET Plasmax Verfahren in verschiedenen Varianten an. Dabei wird die Behälterinnenseite mit einer hauchdünnen Schutzschicht aus Glas überzogen wobei empfindliche Produkte wie Fruchtsaft, Wein, Bier, Softdrinks, Ketchup, Saucen und andere flüssige Lebensmittel Anwendungsgebiete sind. Laut KHS können die beschichteten Flaschen, wie sortenreines PET, vollständig Flasche zu Flasche recycelt werden.

PET-Flaschen werden vielfach aus im Streckblasverfahren aus Vorformlingen (Preformen) hergestellt. Hierzu müssen die Preformen auf die notwendige Umformtemperatur von ca. 110°C erwärmt werden. Dies erfolgt durch Infrarot-Heizmodule. Durch die Anwesenheit von stark wärmeabsorbierenden Substanzen (sog. 're-heat additives'), im PET-Material (z.B. TiN) kann die Erwärmung sehr viel rascher und energieeffizienter erfolgen. Durch die Zugabe von TiN - bei Einsatzmengen bis zu 20 ppm (mg/kg) in PET - beträgt die Energieersparnis 10 - 20% und führt gleichzeitig zur Beibehaltung der hohen Transparenz der fertigen PET-Flasche (Ökopol 2010).

Versuche von Sanchez et al. (2014), bei denen (u.a.) die Recyclingfähigkeit von PET in Kombination mit ZnO, Nanoclay und Silber⁸ untersucht wurden, zeigten, dass die Einführung der untersuchten Nanopartikel ins Recycling von PET-Recycling zu sichtbaren Abweichungen in der Farbe führt. Dies kann einzelne Anwendungen insbesondere von PET möglicherweise ausschließen. Teilweise kommt es (je nach Polymer und Nanomaterial) zu veränderten Produktqualitäten (Veränderungen der mechanischen Eigenschaften).

Bei PET Flaschen können Überzüge mit amorphem Kohlenstoff oder Siliziumoxid je nach Technologie auf der Innen- oder Außenseite aufgebracht werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Barriereigenschaften sowie der mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit, Festigkeit) bei PET-Flaschen ist ein Multilayer-Aufbau aus nanoskaligen Schichtsilikat-Partikeln, die in eine Polyamid-Matrix eingebunden sind und auf beiden Seiten mit einer PET-Deckschicht coextrudiert werden; bei den Schichtsilikat-Nanopartikeln handelt es sich üblicherweise um oberflächenmodifizierte Montmorillonite mit einer Dicke von 1 nm und einem typischen Durchmesser von ca. 1000 nm (Möller et al. 2012).

⁸ In der EU nicht als Lebensmittelkontaktmaterial zugelassen.

Nach DaNa⁹ sind PET-Flaschen eine der Hauptanwendungen von Nanoclay.

Nach Bumbudsanpharoke & Choi (2015) werden Verpackungen aus PET oder HDPE von pasteurisierter Milch üblicherweise mit TiO₂ vermischt, um negative Effekte durch Licht zu reduzieren.

In einer Stellungnahme zu Nanomaterialien in PET-Recycling Schweiz (2015) wird gesagt, dass mit Nanomaterialien die Sperreigenschaften gegen Gase (z.B. Sauerstoff und Kohlenstoff), Wasserdampf und Aromastoffe erhöht werden. Zudem können die mechanischen und thermischen Eigenschaften oder der UV-Schutz von PET-Getränkeflaschen verbessert werden. Vor allem für Fruchtsäfte und Bier sind diese Anforderungen an das Verpackungsmaterial von großer Bedeutung. Weiters wird gesagt, dass eine Nanobeschichtung von PET-Getränkeflaschen teuer ist und nur Getränkeflaschen behandelt werden, an die besondere Anforderungen gestellt werden. Entsprechend gering ist die Verbreitung dieser Flaschen.

Die EPBP (European PET Bottle Platform) ist eine europäische Initiative die technische Experten zusammenbringt, um neue Technologien und deren Einfluss auf Recyclingprozesse zu bewerten. Die EPBP wird von der European Association of Plastic Recycling and Recovery Organisations (EPRO), von Petcore Europe, von Plastics Recyclers Europe (PRE), von The European Federation of Bottled Waters (EFBW) und von UNESDA (European non-alcoholic beverages association) unterstützt.

Die EPBP erstellt Richtlinien für das Design von PET-Flaschen (Materialwahl, Etiketten, Verschlüsse, etc.) in Hinblick auf die Verträglichkeit für einen Recyclingprozess. Dabei wird zwischen „voll kompatibel“ („YES“), „beschränkt kompatibel“ („Conditional“) und „gering kompatibel“ („NO“) unterschieden.

EPBP hat zwei Richtlinien für PET erstellt: eine für transparente klare/hellblaue PET-Flaschen, die für lebensmittelkontaktaugliches PET eingesetzt werden und eine für transparente gefärbte PET-Flaschen, deren Einsatz oft auf Umreifungen (Verschlussbänder) oder Fasern beschränkt ist.

In der Richtlinie für transparente klare/hellblaue PET-Flaschen wird SiO_x-Plasmabeschichtung als Barrierematerial als „voll kompatibel“ bewertet, während Kohlenstoff-Plasmabeschichtungen nur als „beschränkt kompatibel“ bewertet werden. Direkt-Druck auf Flaschen wird mit Ausnahme des Produktions- und Ablaufdatums (das mit „beschränkt kompatibel“ bewertet wird) als „nicht kompatibel“ bewertet.

In der Richtlinie für transparente gefärbte PET-Flaschen werden sowohl SiO_x- als auch Kohlenstoff-Plasmabeschichtungen als „voll kompatibel“ bewertet.

⁹ DaNa: Informationen zu Nanomaterialien und Nano-Sicherheitsforschung

<https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/wissens-datenbank#anwendung=anwendung/56&material=material/31>
[Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Opake PET-Flaschen, zumeist mit Titandioxid gefärbt, müssen aussortiert werden, da sie sonst die Qualität des Recyclats stark beeinträchtigen. Für opake Flaschen gibt es derzeit kein geeignetes Recyclingverfahren (EPBP 2019).

Nach Bünemann et al. (2016) haben PET-Saftflaschen (ohne Kohlensäure) i. d. Regel keinen Monolayer – PET – A – Aufbau. Zum Schutz des Produktes sind Barrieren (insbesondere Sauerstoffbarrieren) notwendig. Die Barriere kann entweder als separate Schicht ausgeführt werden (sog. Multilayerflaschen) oder durch Additivierung des PET erfolgen. Nach Einschätzung von Bünemann et al. (2016) sind Multilayerflaschen im Segment Säfte und Nektare weitgehend durch additivierte Flaschen substituiert.

Bünemann et al. (2016) schätzen, dass Säfte und Nektare rund 10% der PET-Flaschen in Deutschland ausmachen, wobei der Anteil an den für das Recycling aus qualitativer Sicht sensiblen klaren Flaschen noch höher wäre. Die wichtigsten Sauerstoffbarrieren sind nach Bünemann et al. (2016) Plasmabeschichtungen mit SiO_2 und der Einsatz eines PET-PA-Copolymers, wobei vermutet wird, dass die letztgenannte Variante den Markt dominiert. Bünemann et al. (2016) kommen zum Schluss, dass die derzeit gebräuchlichen Ausführungen von Sauerstoffbarrieren bei Säften und Nektaren mit Bezug auf die etablierten Verwertungsstrukturen in Europa systemunverträglich sind. Für eine nachträgliche Aussortierung im Rahmen des Recyclings existiert zurzeit keine technische Lösung.

Nach Eberle (2010) spielen PET-Flaschen mit optimierter O_2 -/ CO_2 -Barriere (MNM: Carbon Black, SiO_x , Schichtsilikate) bereits eine bedeutende Rolle auf dem Schweizer Markt.

Nach Möller et al. (2009) wurden auf dem Schweizer Markt PET-Flaschen mit optimierter Sauerstoff- und Kohlendioxid-Barriere (v.a. für Bier und Fruchtsäfte) mit nanotechnologisch optimierten Barriereigenschaften bereits verwendet.

2.1.3 Ausgewählte Abfallströme

Im vorhergehenden Kapitel wurden Produkte bzw. Anwendungsbereiche beschrieben, in denen Nanomaterialien zum Einsatz kommen können. Für die Auswahl von zwei im Projekt näher zu betrachtenden Abfallströme, die aus den angeführten Anwendungsbereichen resultieren, wurden sieben unterschiedliche Kriterien herangezogen. Diese Kriterien wurden dem Auftraggeber in einem Projektworkshop vorgestellt und gemeinsam diskutiert.

- **Stand der Technik für Recyclingprozess vorhanden:** Sollte es für einen der betrachteten Abfallströme keinen Stand der Technik der Behandlung geben, wäre dieser Abfallstrom von der Auswahl ausgeschlossen.

- **Recyclingprozess in Österreich:** Nach Möglichkeit soll ein Recyclingprozess in Österreich vorhanden sein. Zusätzlich wurde hier mitberücksichtigt, ob im Recyclingprozess Outputprodukte erzeugt werden, die vergleichbar mit Primärrohstoffen sind.

Bsp.: Die Erzeugung von lebensmitteltauglichem Granulat aus PET-Flaschen im Gegensatz zu einem mechanischen Zerkleinern von Altreifen für Anwendungen vor allem im Outdoorbereich.
- **Homogenität des Abfallstroms:** Dieses Kriterium bildet ab, inwieweit enthaltene Nanomaterialien auf einzelne Bestandteile, sofern enthalten, konzentriert sind.

Bsp.: In Altfahrzeugen können Nanomaterialien sowohl in diversen Kunststoffen, in Beschichtungen und Überzügen oder Lacken, in der Elektronik, in Textilien enthalten sein, wodurch eine Vielzahl an unterschiedlichen Nanomaterialien enthalten sein können. Ebenso sind Elektronik- und Elektroaltgeräte aber auch Altmetalle als heterogen einzuordnen.

Die Homogenität des Abfallstroms wird auch durch das Erfassungssystem des Abfalls beeinflusst. Generell gibt es für alle betrachteten Anwendungsbereiche getrennte Entsorgungswege für die anfallenden Abfälle, wobei jedoch die erfassten Abfälle in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich unterschiedlich homogen sind. Eine getrennte Erfassung bspw. von Alttextilien, PET-Flaschen oder Altpapier führt zu relativ „sortenreinen“ Abfallströmen, während die Entsorgung von Altautos letztlich zu mehreren sehr unterschiedlichen Teilströmen führt.
- **Nutzungsdauer:** Dieses Kriterium berücksichtigt, ob allenfalls eingesetzte Nanomaterialien bereits im Abfallstrom „angekommen“ sind. Die Nutzungsdauer in diversen Anwendungsbereichen kann sehr unterschiedlich sein. Während Nanomaterialien bspw. in Wandfarben, Legierungen oder Li-Akkus erst nach mehreren Jahren, unter Umständen erst nach Jahrzehnten, im Abfallstrom anfallen, ist die Nutzungsdauer etwa bei PET-Flaschen oder Papier vergleichsweise kurz. Hinzu kommt, dass (manche) Nanomaterialien in manchen Anwendungsbereichen erst seit relativ kurzer Zeit eingesetzt werden (sofern überhaupt eingesetzt), andere wiederum bereits seit rund 100 Jahren, wie etwa Carbon Black in Autoreifen.
- **Nanomaterial verbleibt in Anwendung bis zum Nutzungsende:** Bei vielen der betrachteten Anwendungsbereiche ist das Nanomaterial dauerhaft in das Produkt eingebunden und gelangt vollständig in die Abfallwirtschaft. Bei manchen Anwendungsbereichen, wie etwa Textilien, können jedoch während der Nutzung größere Mengen enthaltener Nanomaterialien durch Waschprozesse, Abrieb etc. aus dem Produkt entfernt werden und gelangen nur teilweise in den Abfallstrom und den dahinter liegenden Recyclingprozess.
- **Wirkung auf Rezyklat (Sekundärrohstoff):** Dieses Kriterium zielt darauf ab, jene Abfallströme zu identifizieren bei denen allenfalls enthaltene Nanomaterialien nach

durchlaufen des Recyclingprozesses sich in den erzeugten Sekundärrohstoffen wiederfinden (z.B. Titannitrid in PET-Flaschen).

- **Freisetzung von MNM aus dem Rezyklat (Sekundärrohstoff) in die Umwelt möglich:** Beim Einsatz von erzeugten Sekundärrohstoffen sollen allfällige Freisetzungen von Nanomaterialien in die Umwelt möglichst ausgeschlossen werden (z.B. Sekundärbaustoffe).

Basierend auf diesen Kriterien wurden die Abfallströme „PET-Flaschen“, „Altreifen“ und „Kunststoffverpackungen“ als die geeignetsten Abfallströme identifiziert. In einem Projektworkshop wurden gemeinsam mit dem Auftraggeber letztlich die Abfallströme „PET-Flaschen“ und „Kunststoffverpackungen“ ausgewählt. Für beide Abfallströme gibt es etablierte Recyclingprozesse in Österreich, der Abfallstrom ist insbesondere bei PET-Flaschen sehr homogen, die Nutzungsdauer ist sehr kurz, die Nanomaterialien verbleiben in der Anwendung bis zum Nutzungsende; allenfalls enthaltene Nanomaterialien, die in den Recyclingprozess gelangen, finden sich auch im erzeugten Sekundärrohstoff und die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von MNM aus dem erzeugten Rezyklat in die Umwelt ist sehr gering.

3 Nanomaterialien Einsatzmengen

3.1 Nanomaterialien-Mengen

Informationen über die Inverkehrsetzung von Nanomaterialien sind sehr spärlich und teilweise nicht ganz aktuell.

Gemäß der Europäischen Kommission (2012) beträgt, basierend auf Mengenangaben von SRI¹⁰, die globale Menge an Nanomaterialien, die jährlich gehandelt wird, ca. 11,5 Mio. t. Davon ist Carbon Black (= Industrieruß) mit rund 9,6 Mio. t das mit Abstand meist verwendete Nanomaterial, gefolgt von synthetischem amorphem Silizium (1,5 Mio. t), Aluminiumoxid (200.000 t), Bariumtitanat (15.000 t), Titandioxid (10.000 t), Cerdioxid (10.000 t) und Zinkdioxid (8.000 t). Carbon Nanotubes und Carbon Nanofasern werden in Mengen von mehreren hundert Tonnen gehandelt, und Nanosilber etwa 22 t (wobei etwa 10% des Nano-Silberverbrauchs für antimikrobielle Anwendungen eingesetzt wird). Es gibt zahlreiche weitere Nanomaterialien die in einem Forschungs- oder Entwicklungsstadium sind oder nur in geringen Mengen gehandelt werden, meist für technische oder biomedizinische Anwendungen.

Der Einsatz von Nanomaterialien variiert sehr stark. Von Massenanwendungen bis hin zu hoch spezialisierten gering-volumigen technischen Anwendungen wie bspw. in der Elektronik oder Biomedizin (European Commission 2012).

Mit Abstand die größte Anwendung (in Hinblick auf Marktwert) sind Füllmittel für Gummi in Reifen und anderen gummihaltigen Produkten (hauptsächlich Carbon Black), gefolgt von Füllstoffen in Polymeren (hauptsächlich synthetisches amorphes Silizium, in geringerer Menge auch Metalloxide und Silber). Weiteres wichtiges Einsatzgebiet ist die Elektronik (die größte Anwendung sind Schmiere für chemisch-mechanisches Polieren (CMP¹¹ slurries), ein feines Scheuermittel hpts. aus kolloidalem synthetischen amorphem Silizium), die in der Herstellung von elektronischen Komponenten verwendet werden), gefolgt von vielschichtige Keramikkondensatoren (hauptsächlich aus Bariumtitanat). In Kosmetika wird hauptsächlich synthetisches amorphes Silizium, Titandioxid und Zinkoxid eingesetzt, in biomedizinischen Anwendungen sind nano-Gold in der Diagnostik sowie nano-Silber z.B. in Krankenhaustextilien die wichtigsten Anwendungen. Zusätzlich zu diesen Verwendungen gibt es zahlreiche Anwendungen in Farben und Anstrichen, Katalysatoren, Solarzellen, Brennstoffzellen, etc. (European Commission 2012).

Europa:

Auf der Datenbank des European Observatory for Nanomaterials (EUON) finden sich 340

¹⁰ SRI Consulting reports, cited in European Commission 2012

¹¹ Chemical Mechanical Planarisation

Nanomaterialien, die derzeit in der EU hergestellt oder in die EU importiert werden. Zu einigen dieser Substanzen gibt es relativ grobe Mengenangaben, wobei es jedoch zumeist nicht klar ist, ob es sich ausschließlich um die Nanoform handelt.

Ausgewählte Beispiele:

Carbon Black: 1 -10 Mio. t

Titandioxid: > 1 Mio. t

Synthetisches amorphes Siliziumdioxid: > 1 Mio. t

Zinkoxid: 100.000 – 1.000.000 t

Titannitrid: 10 – 100 t

In Frankreich, Belgien, Dänemark, Norwegen und Schweden bestehen nationale Berichtspflichten über die im Land produzierten oder ins Land importierten Mengen an Nanomaterialien. In den jeweiligen Ländern werden unterschiedliche Abweichungen/Ausnahmen in der Berichtspflicht gemacht. Als Beispiel werden im Folgenden Frankreich und Belgien kurz vorgestellt.

Frankreich:

In Frankreich besteht seit 2013 eine verbindliche Berichtspflicht für Unternehmen und Organisationen, z. B. Universitäten, die Nanomaterialien herstellen, importieren oder vertreiben und dabei ein jährliches Aufkommen von mehr als 100 Gramm Nanomaterialien verzeichnen. Dieser Schwellenwert von 100 g liegt dabei weit unter der Informationspflicht nach REACH (>1t/Jahr seit 2018).

Frankreich war mit dieser Regelung Vorreiter in Europa. Die französische Regelung umfasst dabei alle Bereiche in denen Nanomaterialien eingesetzt werden.

„Nanomaterial“ wird im Sinne der Empfehlung der EU-Kommission verwendet.

Neben den im Land hergestellten und importierten Mengen von Nanomaterialien ist auch der Verwendungszweck anzugeben. Im Falle von Exporten kann der Verwendungszweck unbekannt sein.

2017 wurden 424 323 t Nanomaterialien in Frankreich hergestellt oder nach Frankreich importiert (Import 120.041 t). Dies entspricht etwa der Menge aus 2015.

Ca. 11% der Deklarationen von Nanomaterialien betreffen die Kunststoffproduktion.

Mengenmäßig waren im Jahr 2017 Carbon Black, SiO₂, Calciumcarbonat und TiO₂ mit jeweils mehr als 10.000 t die wichtigsten Nanomaterialien. 7 weitere Nanomaterialien wurden in Mengen zwischen 1.000 und 10.000 t in Frankreich hergestellt oder nach Frankreich importiert (Ecologique-solidaire 2017). Diese Mengen werden (im veröffentlichten Bericht für 2017) ohne weitere Detaillierung verschiedenen Anwendungen zugeordnet, wie etwa Titandioxid u.a. zu „Artikeln aus Kunststoff“.

Belgien:

In Belgien müssen laut dem KE (Königlichen Erlass) vom 27. Mai 2014 Unternehmen Nanowerkstoffe, die sie auf den belgischen Markt bringen, registrieren. Das Register ist ab dem 1. Januar 2016 verpflichtend für die im Nanopartikelzustand hergestellten Stoffe (so wie Titandioxid, Zinkoxid) und ab dem 1. Januar 2017 für Mischungen mit diesen Stoffen (z.B. Farben, Sonnencreme).

Schwellenwert ist, wie in Frankreich, 100g/Jahr.

Nicht registriert werden müssen in Belgien (u.a.) Biozidprodukte, Human- und Tierarzneimittel, Lebensmittel oder Produkte, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, Futtermittel oder Verarbeitungshilfsstoffe und sonstige Erzeugnisse, die bei der Verarbeitung ökologischer/biologischer Zutaten landwirtschaftlichen Ursprungs verwendet werden dürfen (Verordnung (EU) Nr. 889/2008).

2016 wurden 475 Registrierungen von 98 Registranten eingereicht. Diese Registrierungen umfassen etwa 150 verschiedene chemische Stoffe (anhand der CAS-Nummer). Insgesamt wurden 75.000 t im nanopartikulären Zustand produzierte Stoffe, entweder durch Import (57.550t) oder durch Produktion, auf den belgischen Markt gebracht. Dabei wurden amorphes Siliziumdioxid, Calciumcarbonat, mit Stearinsäure behandeltes Calciumcarbonat, Industrieruß, Dieisentrioxid, Eisenhydroxid-oxid gelb und Siliziumdioxid in einer höheren Menge als 1.000 t produziert und/oder eingeführt (FOD 2017).

Die registrierten Mengen müssen NACE-Codes zugeordnet werden, wobei in Belgien zusätzlich zur viergliedrigen NACE Klassifikation eine zusätzliche nationale Untergliederung erfolgt (NACEBEL – in Summe 943 belgische Unterklassen).

Die meisten registrierten Betriebe geben als Tätigkeit die Herstellung von Basiskunststoffen an (NACEBEL 20160).

Österreich:

Statistiken oder Abschätzungen in welchem Umfang Nanomaterialien in Österreich hergestellt werden oder nach Österreich importiert werden, liegen keine vor.

3.2 Aufkommen und Behandlung von Verpackungskunststoffen und PET-Flaschen

In BMNT 2017 und BMNT 2019 findet sich das Aufkommen an Verpackungsabfällen aus Kunststoffen in den Jahren 2011 bis 2016. Demnach fallen rund 300.000 t derartiger Abfälle im Inland an. Die Mengen beinhalten auch PET-Flaschen.

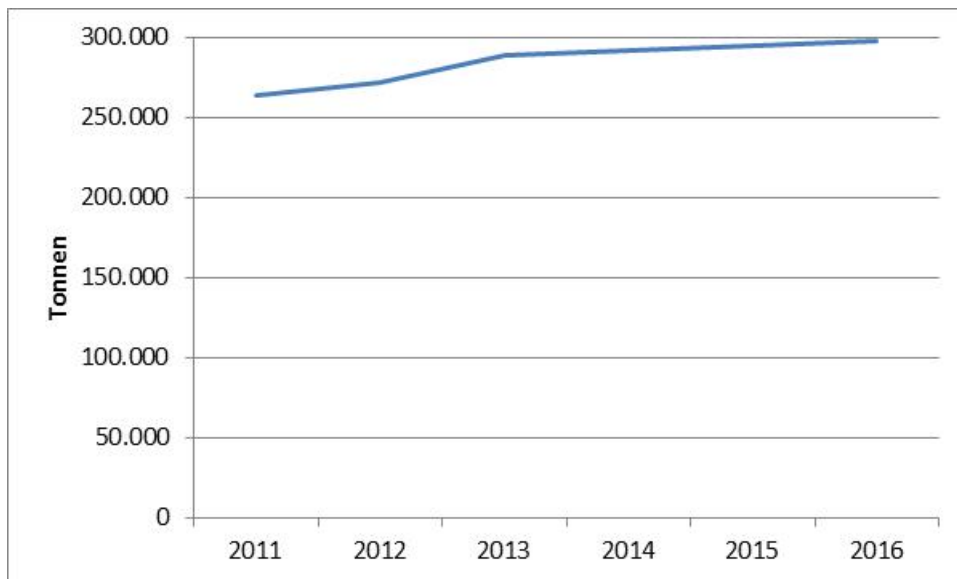


Abbildung 1: Aufkommen Verpackungsabfall aus Kunststoffen 2011-2016

In van Eygen et al. (2018) finden sich Angaben über das Aufkommen untergliedert nach Fraktionen. Dabei werden folgende Fraktionen unterschieden: „PET-Flaschen“, „Folien groß“ (> 1,5 m²), „Folien klein“ (< 1,5 m²), „Hohlkörper klein“ (< 5l), „Hohlkörper groß“ (> 5l), „EPS groß“ (> 0,1 kg) und „andere“ mit Bezugsjahr 2013. Als Gesamtaufkommen wird eine Menge von 293.000 t angegeben und entspricht damit relativ genau dem Wert aus BMNT 2017.

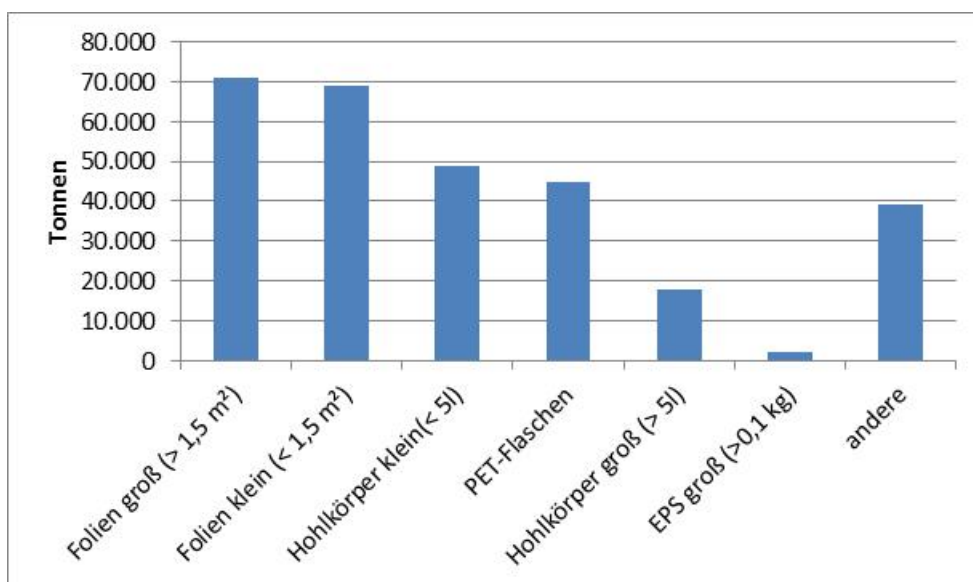


Abbildung 2: Aufkommen an Kunststoffverpackungsabfällen im Jahr 2013. Quelle: van Eygen et al. (2018)

In van Eygen et al. (2018) finden sich auch die Verwertungswege der einzelnen betrachteten Kunststoffverpackungsfraktionen.

Tabelle 1: Verwertung von Kunststoffverpackungen im Jahr 2013 in t

	PET-Flaschen	Folien groß	Folien klein	Hohlkörper groß	Hohlkörper klein	EPS groß	andere
Abfallaufkommen	45.000	71.000	69.000	18.000	49.000	2.300	39.000
Input in Recyclinganlagen	24.400	39.000	17.300	5.700	10.000	1.600	1.400
Regranulat	11.000	28.100	12.300	5.000	9.000	1.600	1.200
Lebensmitteltaugliches Regranulat	9.400						
Industrielle Verbrennung oder Müllverbrennung	24.500	42.250	56.500	13.000	39.200	700	37.200
Deponierung von Reststoffen*	500	900	400	300	600	0	650

* Kunststoffreste in MBA Output, Verbrennungsrückstand

Quelle: van Eygen et al. (2018)

Neben dem inländischen Abfallaufkommen werden auch relevante Mengen an PET-Abfällen sowie Kunststofffolien importiert. Nach UBA (2017) wurden 2015 ca. 32.000 t „Kunststofffolien“ sowie 18.000 t PET-Abfälle importiert.

Die Kapazität der drei österreichischen Anlagen für PET-Flaschenrecycling (PET to PET Recycling Österreich GmbH, Kruschitz GmbH und PET Recycling Team) beläuft sich, basierend auf Internetangaben der Betreiber, auf ca. 68.000 t.

3.2.1 Nanomaterialien in PET Flaschen

Als Ergebnis des ExpertInnen- und Stakeholder-Workshops kann festgehalten werden:

- Titannitrid wird auch in Österreich als re-heat-Additiv eingesetzt.
- Im Input zu den Recyclinganlagen werden opake Kunststoffflaschen (zumeist mit TiO₂ gefärbt, enthalten aber auch farblose TiO₂ Partikel in Nanogröße) aussortiert, da diese die Qualität des erzeugten Recyclats negativ beeinflussen würden. Diese Fraktion wird zumindest z.T. einer thermischen Behandlung zugeführt.
- Bei der Erzeugung der PET-Flaschen werden auch „Additiv-Cocktails“ eingesetzt, deren Zusammensetzung unbekannt ist.

- Bei Waschprozessen im PET-Recyclingprozess werden auf Etiketten aufgedruckten Farben abgelöst und sammeln sich in der Waschlauge an. Farbpigmente können in Nanogröße vorliegen.

Für Titanitrid kann folgende Abschätzung gemacht werden: bei einem Inlands-Abfallaufkommen von 45.000t und einem Import von rund 15.000t ergibt sich eine Gesamtmasse von ca. 60.000t PET-Flaschen jährlich.

PETtoPET (2019) gibt an, dass 10.000 PET Flaschen etwa 250 kg entsprechen. Nach PET-Recycling Schweiz¹² wiegt ein PET Ballen 200 – 300 kg und enthält 5.000 – 6.000 Flaschen.

Diese Mengen sind inklusive Verschlüsse und Etiketten. Pro Flasche kann für die Verschlüsse (aus PE) ca. 2,7 g und für die Etiketten ca. 3,2 g angesetzt werden (Fehringer 2019). Unter der Annahme von 7.500 Flaschen pro Ballen ergibt sich eine Masse an Verschlüssen und Etiketten von ca. 44 kg je Ballen bzw. ca. 18%.

Ohne Verschlüsse und Etikettengewichte ergibt sich somit etwa eine Menge von ca. 49.400 t PET.

Würden bei der gesamten Masse die maximal zulässige Menge an Titanitrid eingesetzt (20 mg/kg) so ergibt sich eine Gesamtmenge an TiN von ca. 985 kg.

Nach WKO 2019 wurden 2018 in Österreich 1,75 Mio. m³ Getränke in Kunststoffflaschen abgefüllt, dies entspricht 45,4% der insgesamt abgefüllten Getränke (ohne Fass und Container).

Nach Getränkearten werden 83,9% des Wassers, 74,9% der Limonaden, 5,6% der Milch, 35,3% der Fruchtsäfte sowie 0,4% des Bieres in Kunststoffflaschen abgefüllt.

Bezogen auf die in Kunststoffflaschen abgefüllten Mengen ergeben sich folgende Anteile: 45,1% sind Wasser, 42,3 % Limonaden, 2% Milch, 9,9% Säfte und 0,2% Bier.

Bei Milch, Säften und Bier ist davon auszugehen, dass diese zumindest teilweise in Kunststoffflaschen, die mit nanomaterialhaltigen Barrieren ausgestattet sind, abgefüllt werden. Bei anderen kohlesäurehaltigen Produkten ist der Einsatz von Stoffen, die die Barriereigenschaften und damit die Regallebenszeit (shelf-life-Zeit) erhöhen, ebenfalls denkbar.

¹² <https://www.petrecycling.ch/de/wissen/pet-kreislauf>; [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Eine mengenmäßige Abschätzung ist jedoch nicht möglich, da Angaben über Konzentrationen oder Anteile von Gebinden die Nanomaterialien enthalten, nicht vorliegen.

3.2.2 Nanomaterialien in Verpackungskunststoffen

Im Rahmen des Stakeholder-Workshops wurde bestätigt, dass beim zu behandelnden Verpackungskunststoff zumindest Carbon Black enthalten ist. Carbon Black erschwert die Sortierung von Kunststoffen, da dieses mittels NIR nicht detektiert werden kann. Bei Folien wird Carbon-Black-haltiges Material ausschließlich für die Herstellung niederwertiger Produkte (wie z.B. Müllsäcke, Agrarfolien, Baufolien) genutzt.

Im Workshop wurde mehrfach darauf verwiesen, dass bei den importierten Kunststoffen auf Grund der lückenhaften Kontrolle auch Kunststoffe dabei sein könnten, die sowohl Nanomaterialien, die in der EU nicht zugelassen sind, als auch in Konzentrationen die höher als in der EU erlaubt sind, enthalten.

Im Workshop wurde betont, dass Erzeuger von Kunststoffen die genaue Zusammensetzung des Kunststoffes nicht bekannt geben. Vermutet wird, dass dies mit dem Schutz vor Konkurrenz zu tun hat.

Kenntnisse über das Ausmaß des Einsatzes von Nanomaterialien in Verpackungen liegen nicht vor. Eine Abschätzung der eingesetzten Mengen an Nanomaterialien war somit nicht möglich.

4 Konsequenzen für Gesetzgebung

4.1 Gesetzliche Randbedingungen

Im Folgenden sind einzelne gesetzliche Randbedingungen angeführt, mit Schwerpunkt auf die betrachteten Abfallströme PET-Flaschen und Verpackungskunststoffe und beleuchtet inwieweit diese nanospezifische Vorgaben beinhalten. Im Wesentlichen orientieren sich die Ausführungen auf Europäischer Ebene auf Informationen des Österreichischen Portals für Nanotechnologie.¹³

Die REACH-Verordnung der EU ((EG) Nr. 1907/2006) zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe deckt Nanoformen und die Nicht-Nanoformen eines Materials als dem zugrundeliegenden Stoff ab. Früher wurde gar nicht bzw. nicht ausreichend zwischen den Nanoformen und den Nicht-Nanoformen eines chemischen Stoffes unterschieden und damit nicht berücksichtigt, dass Nanoformen eines Stoffes andere Gefahren und ein anderes Verhalten gegenüber Mensch und Umwelt als größerskalige Ausprägungen desselben Stoffes aufweisen können. Im Dezember 2018 veröffentlichte die Europäische Kommission die Anpassungen der REACH-Verordnung. Die Hersteller und Importeure von Nanomaterialien als auch weitere Akteure der Lieferkette müssen nun ab 1. Jänner 2020 nanospezifische Daten für deren Registrierung erfassen und für die Bewertung der Risiken für Mensch und Umwelt berücksichtigen. Die Überarbeitungen der REACH-Verordnung betreffen die Anhänge: I, III, sowie VI - XII. In Anhang VI der REACH-Verordnung wurde die Definitionsempfehlung der Europäischen Kommission zu Nanomaterialien aufgenommen.

Ab 2020 sind somit nanospezifische Angaben notwendig, um das Risiken für Mensch und Umwelt durch Nanomaterialien durch deren Verwendung abschätzen und kontrollieren zu können.

CLP-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging) (EG) Nr. 1272/2008¹⁴

Durch diese Verordnung wird EU-weit das auf UN-Ebene entwickelte Globally Harmonized System (GHS) zur weltweit harmonisierten Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien unmittelbar rechtswirksam. Die CLP-Verordnung geht jedoch teilweise über GHS hinaus.

¹³ <https://nanoinformation.at/bereiche/regelungen.html> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

¹⁴ Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 [ABl. L 353 vom 31.12.2008, S. 1].

Zwischen der CLP-Verordnung und der REACH-Verordnung gibt es eine Reihe von Berührungspunkten, wobei sich die Regelungsbereiche jedoch unterscheiden. Die REACH-Verordnung gilt in erster Linie für Stoffe, und die von ihr aufgestellten Pflichten sind in weiten Teilen an Mengenschwellen gebunden (z. B. die Registrierungspflicht). Im Gegensatz dazu unterliegen alle Chemikalien – unabhängig davon, ob es sich um Stoffe oder Gemische handelt – vor dem Inverkehrbringen generell der Einstufungs- und Kennzeichnungspflicht, es sei denn, sie sind ausdrücklich von diesen Pflichten ausgenommen.

Einstufung bezeichnet den Prozess der Feststellung, welche Gefahren (schädliche Wirkungen) von einem Stoff oder einem Gemisch ausgehen. Das GHS unterscheidet grundsätzlich zwischen physikalischen Gefahren, Gesundheitsgefahren und Umweltgefahren. Das GHS umfasst 16 Gefahrenklassen für physikalisch-chemische Gefahren (z.B. entzündbare Gase, Gase unter Druck, selbstzersetzliche Stoffe und Gemische), 10 Gefahrenklassen für Gesundheitsgefahren (z.B. Ätz-/Reizwirkung auf die Haut, Schwere Augenschädigung/Augenreizung, Karzinogenität) und 2 Gefahrenklassen für die Umweltgefahren (gewässergefährdend, die Ozonschicht schädigend).

Die Kennzeichnung erfolgt mittels standardisierter Piktogramme und soll Personen, die mit einem Stoff oder einem Gemisch umgehen, auf die festgestellten Gefahren aufmerksam machen und vor nachteiligen Auswirkungen schützen.

Lebensmittelkontaktmaterialien

Derzeit gibt es im Lebensmittelkontaktmaterialien-Recht keine "nanospezifischen" Bestimmungen. Die EU-Verordnung für Lebensmittelverpackungen (VO (EG) Nr. 1935/2004) gilt auch für Verpackungen, die mit Hilfe von Nanotechnologie hergestellt werden oder Nanomaterialien enthalten. Hier wird festgeschrieben, dass Materialien und Gegenstände, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, wie beispielsweise Frischhaltedosen oder Küchenutensilien, keine Bestandteile an Lebensmittel abgeben dürfen, die die menschliche Gesundheit gefährden oder das Lebensmittel negativ verändern.

Bei der Verwendung von "aktiven und / oder intelligenten Nanopartikeln", deren Einsatz in Lebensmittelkontaktmaterialien die Haltbarkeit verlängern, indem sie den Zustand des verpackten Lebensmittels erhalten oder verbessern, Stoffe an das verpackte Lebensmittel oder die das Lebensmittel umgebende Umgebung abgeben oder diesen entziehen, müssen auch andere gesetzliche Vorschriften eingehalten werden. Für diese wird künftig eine Zulassung erforderlich sein (EU Verordnung Nr. 450/2009). Weiters müssen diese speziellen Produkte eine angemessene Kennzeichnung aufweisen, die darauf aufmerksam macht, dass es sich um aktive und / oder intelligente Materialien und Gegenstände handelt.

Für bestimmte Bestandteile in Lebensmittelkontaktmaterialien aus Kunststoff (VO (EG) Nr. 10/2011) und solchen aus Zellglasfolie¹⁵ (EU Richtlinie 2007/42/EG) bestehen derzeit im EU-Recht Zulassungsverfahren. Nanoformen eines Stoffes dürfen nur dann verwendet werden, wenn sie ausdrücklich zugelassen sind.

Die EU-Verordnung Nr. 10/2011 sieht für Nanopartikel in Lebensmittelkontaktmaterialien aus Kunststoff vor einer Zulassung eine Risikobewertung auf Einzelfallbasis vor.

Nach der Richtlinie über Lebensmittelkontaktmaterialien aus Zellglasfolien dürfen nur explizit in der Richtlinie angeführte Stoffe oder Stoffgruppen unter Einhaltung der dort genannten Voraussetzungen eingesetzt werden. Andere als die in der Richtlinie aufgeführten Stoffe dürfen verwendet werden, sofern diese als färbende Stoffe (Farben und Pigmente) oder als Klebstoff verwendet werden, vorausgesetzt, dass kein Übergang dieser Stoffe durch eine validierte Methode in oder auf den Lebensmitteln festgestellt wird. Wird Zellglasfolie mit Kunststoff beschichtet, dürfen vor der Beschichtung nur die in der Richtlinie aufgeführten Stoffe oder Stoffgruppen unter Einhaltung der dort genannten Voraussetzungen verwendet werden. Die Beschichtungen selbst dürfen nur die in den Anhängen II bis VI der Richtlinie 2002/72/EG¹⁶ (Lebensmittelkontaktmaterialien aus Kunststoffen) aufgeführten Stoffe oder Stoffgruppen unter Einhaltung der dort genannten Beschränkungen verwendet werden.

In der RL 2002/72 sind zugelassen Monomere und sonstige Ausgangsstoffe aufgelistet. Neue Stoffe zur Verwendung dürfen nur noch nach dem Verfahren des Artikels 4 der Richtlinie 89/109/EWG¹⁷ zulassen werden.

Voraussetzung für die Zulassung eines Lebensmittelkontaktmaterials ist eine gesundheitliche Bewertung durch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA). Eine Zulassung wird nur dann erteilt, wenn sich nach Auffassung der EFSA keine gesundheitlichen Bedenken ergeben. Die Zulassungen werden - sofern erforderlich - auf bestimmte Anwendungen beschränkt. Zudem sind Höchstmengenregelungen zu beachten.

Solche Zulassungen sind auch für Materialien erforderlich, die teilweise oder vollständig aus recyceltem Kunststoff hergestellt werden und mit Lebensmittel in Berührung kommen sollen. Die Verfahren, die zur Herstellung von Recyclaten eingesetzt werden, müssen zuvor von der

¹⁵ Zellglasfolie ist eine dünne Folie, die aus einer raffinierten Zellulose aus nicht wiederverarbeitetem Holz oder nicht wiederverarbeiteter Baumwolle gewonnen wird. Um den technischen Anforderungen zu genügen, können geeignete Stoffe entweder in der Masse oder auf der Oberfläche beigefügt werden. Zellglasfolien können auf einer oder auf beiden Seiten beschichtet sein.

In Österreich wird die Zellglasfolien-Richtlinie der EU (2007/42/EG) in der Verordnung über Gebrauchsgegenstände aus Zellglasfolie (BGBl. Nr. 128/1994 idGF) in nationales Recht umgesetzt.

¹⁶ RICHTLINIE 2002/72/EG DER KOMMISSION vom 6. August 2002 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen

¹⁷ Durch EU-Verordnung für Lebensmittelverpackungen VO (EG) Nr. 1935/2004 aufgehoben.

EFSA einer Sicherheitsbewertung unterzogen und von der Europäischen Kommission zugelassen worden sein. Die VO (EG) Nr. 282/2008 legt Regelungen für die Zulassung von Verfahren zur Wiederverwertung solcher Materialien fest.

Für Produkte, die nicht unter spezifische rechtliche Regelungen fallen, gewährt das allgemeine Produktsicherheitsrecht gewisse Sicherheitsstandards.

In der Österreichischen Gesetzgebung finden sich für die betrachteten Abfallströme keine direkten Regelungen betreffend Nanomaterialien.

Im Abfallwirtschaftsgesetz (BGBl. I Nr. 102/2002) wird in § 37 festgelegt, dass die Errichtung, der Betrieb und die wesentliche Änderung von ortsfesten Behandlungsanlagen¹⁸ der Genehmigung der Behörde bedürfen. Nach § 43 ist eine Genehmigung zu erteilen, wenn zu erwarten ist, dass die Behandlungsanlage neben den Voraussetzungen der gemäß § 38 anzuwendenden Vorschriften u.a. das Leben und die Gesundheit des Menschen nicht gefährdet.

Die Abfallbehandlungspflichtenverordnung (BGBl II Nr. 102/2017) regelt Mindestanforderungen an die Sammlung, Lagerung, den Transport und die Behandlung wichtiger Abfallströme (Elektro- und Elektronik-Altgeräte, Batterien, Lösemittel und lösemittelhaltige Abfälle, Farb- und Lackabfälle, Verletzungsgefährdende, medizinische Abfälle, Amalgamhaltige Abfälle, PCB-haltige Abfälle, Gärrückständen aus Biogasanlagen, die Abfälle einsetzen).

ArbeitnehmerInnenschutz

Um den Schutz der ArbeitnehmerInnen sicherstellen, gibt es im Wesentlichen drei Regelungen, wobei jedoch keine Regelung spezifische Bestimmungen für den Umgang mit Nanomaterialien stellt.¹⁹

- Österreichische Bundesgesetz über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit (ArbeitnehmerInnenschutzgesetz – AschG BGBl. Nr. 450/1994 idgF): dieses Gesetz regelt grundsätzlich die Sicherheit und den Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz und gilt daher auch für den Umgang mit Nanomaterialien.
- Verordnung über Grenzwerte für Arbeitsstoffe und über krebserzeugende Arbeitsstoffe (B-GKV, BGBl. II Nr. 393/2002 idgF): legt Konzentrationen fest, die ein gefährlicher Arbeitsstoff am Arbeitsplatz keinesfalls überschreiten darf.
- Verordnung über den Schutz der ArbeitnehmerInnen vor explosionsfähigen Atmosphären (VEXAT BGBl II Nr. 309/2004 idgF): regelt den Explosionsschutz am Arbeitsplatz. So ist auch beim Umgang mit brennbaren Nanomaterialien darauf zu

¹⁸ „Behandlungsanlagen“: ortsfeste oder mobile Einrichtungen, in denen Abfälle behandelt werden, einschließlich der damit unmittelbar verbundenen, in einem technischen Zusammenhang stehenden Anlagenteile

¹⁹ <https://nanoinformation.at/bereiche/regelungen.html> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

achten, dass bei staubförmiger Verteilung sowie entsprechender Staubmenge durchaus Explosionsgefahr besteht.

Mit Ausnahme von Lebensmitteln und Kosmetika gibt es derzeit keine Kennzeichnung von Nanomaterialien in Produkten.

Während bei der Herstellung von Nanomaterialien allfällige Schutzmaßnahmen einfach getroffen werden können, kann bereits bei der Weiterverarbeitung, z.B. bei der Zugabe von Nanomaterialien zu Produkten wie Kunststoffen oder Lacken, die Information, dass mit Nanomaterialien gearbeitet wird, abnehmen. Besonders schwierig wird die Beurteilung dann, wenn nanohaltige Produkte weiterverarbeitet werden, ohne dass auf der Verpackung oder im Sicherheitsdatenblatt Hinweise auf Nanomaterialien zu finden sind.

Ob Beschäftigte tatsächlich gefährdet sind, hängt davon ab, wie stark die Nanomaterialien im Produkt gebunden sind und ob beim Arbeitsverfahren Staub oder Nebel entstehen können. Besonders wenige Informationen haben Arbeitgeber und Beschäftigte in der Entsorgung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in Hinblick auf Nanomaterialien durch die REACH Novelle sowie die Verordnung betreffend Lebensmittelkontaktmaterialien aus Kunststoff zulassungsseitig spezifische Regelungen existieren. Die Information über den Inhalt von Nanomaterialien in Produkten lässt über die Lieferkette bis zum Entsorger sehr rasch nach bzw. sind nicht mehr vorhanden. Diverse Regelungen die nicht die Zulassung betreffen, wie etwa Kennzeichnungspflichten (Ausnahme Lebensmittel und Kosmetika), die ArbeitnehmerInnenschutzbestimmungen oder abfallwirtschaftliche Regelwerke enthalten nur allgemeine Bestimmungen die Nanomaterialien miteinschließen.

5 MNM im Recyclingprozess

Dieses Kapitel gibt einleitend einen kurzen Überblick über Kunststoffe (Kapitel 5.1) und verschiedene Verwertungsverfahren (Kapitel 5.2), insbesondere für PET-Getränkeflaschen (Kapitel 5.3) und Kunststoffverpackungsfolien (Kapitel 5.4), bevor es konkret auf die Auswirkungen von MNM auf das Recycling von nanomaterialhaltigen PET-Flaschen und Verpackungsfolien eingeht (Kapitel 5.5). Kapitel 5.6 beschreibt Ansatzpunkte für Verbesserungen im Kunststoffrecycling, die sich indirekt auch auf Nanomaterialien im Kunststoff auswirken. Abschließend wird ein Ausblick auf erwartete Entwicklungen von MNM im Kunststoff (Kapitel 5.7) gegeben.

5.1 Einführung zu Kunststoffen

Kunststoffe sind synthetisch-organische Werkstoffe, deren Herstellung maßgeblich durch chemisch-technische Prozesse bestimmt wird. Der Begriff „synthetisch“ beschreibt, dass Kunststoffe ganz oder teilweise durch chemische Reaktionen (Synthesen) entstanden sind. Der Begriff „organisch“ weist darauf hin, dass Kunststoffe überwiegend aus dem chemischen Element Kohlenstoff aufgebaut sind und dadurch der Organischen Chemie, einem Teilbereich der Chemie, zugeordnet werden. Der (meist) vierbindige Kohlenstoff (C) kann sich aufgrund seiner großen Bindungsfähigkeit in fast unbegrenztem Umfang mit sich selbst und anderen, v.a. nicht-metallischen chemischen Elementen, wie z.B. Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N) verbinden. In Kunststoffe können zusätzlich noch andere chemische Elemente (z.B. Chlor (Cl), Fluor (F), Schwefel (S), Silizium (Si)), Metalloxide (z.B. Titandioxid (TiO₂)) und metallorganische Verbindungen eingebunden sein (Kaiser 2016). Das führt zu einer großen Zahl und Vielfalt an heute schon bekannten Verbindungen.

Kunststoffe sind in der Regel Mischungen, die hauptsächlich aus Makromolekülen (Polymeren) bestehen und denen gewisse Anteile von anderen Substanzen, d.h. Zusatzstoffe bzw. Additive (z.B. Stabilisatoren, Füllstoffe, Farbstoffe) beigemischt sind. Die Zusatzstoffe werden gezielt zugesetzt (z.B. auch in nanoskaliger Form), um die Eigenschaften des Kunststoffs für die Aufbereitung oder Verarbeitung zu modifizieren. Sie geraten dadurch bei der Herstellung der Makromoleküle als Nebenprodukte in diese hinein.

Da Kunststoffe aus einer Vielfalt an Grundbausteinen (Monomere) synthetisiert werden können, die in zahlreichen Varianten miteinander chemisch reagieren und sich vernetzen können und da verschiedene Monomere vor der Polymerisierung miteinander vermischt werden können (Copolymere), ergeben sich eine Vielzahl an existierenden Kunststoffsorten. Die atomare und

strukturelle Zusammensetzung sowie der Grad der Vernetzung der Makromoleküle und die verschiedenen Zusatzstoffe sind ausschlaggebend für die Werkstoff- und Recyclingeigenschaften (thermische und mechanische Belastbarkeit, Löslichkeit, Dichte) der Kunststoffe.

5.1.1 Kunststoffsorten

Kunststoffe können nach verschiedenen Kriterien unterteilt werden (Kaiser 2016):

- Möglichkeit der plastischen Formgebung unter Anwendung von Wärme und/oder Druck:
 - Unvernetzte Kunststoffe: durch Erwärmung ist eine plastische Formgebung mehrmals möglich
 - Vernetzte Kunststoffe: nach einmaligem Durchlaufen ihres plastischen Zustands kommt es zu einer irreversiblen Aushärtung; bei erneutem Erwärmen erweichen sie nicht mehr
- Thermisch-mechanisches Verhalten (aufgrund von Unterschieden im Aufbau der makromolekularen Struktur)
 - Thermoplaste (amorph oder teilkristallin) und thermoplastische Elastomere
 - Elastomere (physikalisch vernetzt oder chemisch vernetzt)
 - Duroplaste (chemisch vernetzt)

Thermoplasten: Thermoplasten sind Kunststoffe, in denen die Makromoleküle unvernetzt nebeneinander vorliegen. Bei ausreichender Wärmezufuhr sind sie plastisch formbar bzw. können schmelzen. Sobald Thermoplasten wieder auf Normaltemperatur abkühlen, werden sie wieder fest und belastbar. Die Erwärm- und Abkühlvorgänge lassen sich beim gleichen Material theoretisch unendlich oft wiederholen. Diese Zustandsänderungen und die Filtrierbarkeit der viskosen Schmelzen prädestinieren Thermoplasten für mechanisches Recycling. Zu den Thermoplasten zählen die wichtigsten Kunststoffsorten, die für Verpackungsfolien und Getränkeflaschen eingesetzt werden, wie z.B. Polyethylen, Polypropylen und Polyethylenterephthalat (sh. Tabelle 1).

Polyethylen kann mit niedriger (low-density), mittlerer und hoher (high-density) Dichte produziert werden. Low-Density Polyethylen (LDPE / PE-LD) wird v.a. für Folien, Blasfolien, Schrumpffolien, Schrumpfschläuche, Beschichtungen und Verpackungen eingesetzt. Linear-low-density Polyethylen (LLDPE / PE-LLD) verwendet man hauptsächlich für Verpackungen und Plastikbehälter. High-density Polyethylen (HDPE / PE-HD) dagegen wird für die Erzeugung von Behältern, Spielzeug sowie Benzintanks, Rohre und Haushaltswaren herangezogen. Im

medizinischen sowie Lebensmittelbereich wird Polypropylen (PP) auch als Verpackungsmaterial verwendet.²⁰

Elastomere: Bei den Elastomeren sind die Makromolekülketten untereinander weitmaschig dreidimensional chemisch vernetzt. Elastomere sind gummiartig-elastische Kunststoffe, die bei Wärmezufuhr nicht plastisch formbar sind. Erwärmung, oxidativer Abbau und mechanische Beanspruchung zerstören die Vernetzungen der Makromoleküle zum Teil, was für ein Recycling nutzbar gemacht werden kann. Elastomere werden nicht für Verpackungsfolien eingesetzt.

Thermoplastische Elastomere verhalten sich bei Raumtemperatur wie die klassischen Elastomere. Wird ausreichend Wärme zugeführt, lassen sie sich aber auch plastisch verformen. Sie werden nicht für Verpackungsfolien eingesetzt.

Duroplaste: Die Makromoleküle der Duroplaste sind engmaschig miteinander vernetzt und bilden aufgrund ihrer festen Bindungen zwischen den Makromolekülen formstabile Kunststoffe, die ebenso wie Elastomere bei Wärmezufuhr nicht plastisch verformbar sind. Sie werden nicht für Verpackungsfolien eingesetzt.

Polymermischungen bzw. **Polymerblends:** Kunststoffe können modifiziert werden, indem verschiedene Kunststoffsorten miteinander vermischt werden, die sich häufig aus einer Matrix mit einer dispergierten Phase zusammensetzen.

Kunststoffverbunde, wie z.B. Mehrschichtverbunde und Mischwerkstoffverbunde, stellen eine weitere wichtige Werkstoffgruppe dar. Zu den Mehrschichtverbunden zählen z.B. auch die Verbundfolien. Das sind mehrschichtige Verpackungsfolien (Multilayer-Folien), die je nach Verwendungszweck spezifisch aufgebaut sind und in vielen Branchen (z.B. Lebensmittelindustrie, Kosmetikindustrie, für medizinische und chemische Verpackungen oder als Verpackung für Tierfutter) eingesetzt werden. Je nach Kombination der unterschiedlichen Folienschichten können spezifische Eigenschaften wie UV- und Lichtschutz, Barrierschutz gegenüber Luftfeuchtigkeit oder Temperaturbeständigkeit je nach Verpackungsgut erreicht werden.

Kunststoffmischungen und -verbunde erschweren im Normalfall den Recyclingprozess, weil die einzelnen Komponenten nur schwer oder häufig gar nicht aufgeschlossen werden können.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über Kunststoffe, die für Verpackungsfolien und Getränkeflaschen eingesetzt werden können.

²⁰ Vergl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyolefine> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Tabelle 2: Kunststoffsorten und -klassen für Folien und Getränkeflaschen (nach Abts 2014 und Martens & Goldmann 2016))

Anwendungsbereich	Thermoplast	Duroplast	Elastomer
Agrarfolien / Gewächshausfolien	EVAC, PE, PVC, TPS,	-	-
Barrierefolien	EVOH, PVDC, PVAL	-	-
Bioabfallbeutel	TPS	-	-
Dachfolien	-	-	CM, CSM
Elektroisolierfolien	PET	-	-
Flaschen	PET	-	-
Folien	PE, PET, PP, PS, PVC, SBS	-	-
Müllbeutel	PE	-	-
Prägefolien	PVC	-	-
Tragetaschen	PE	-	-
Verpackungen	PE, PP, PET, PLA, PHB	-	-
Verpackungen für Lebensmittel	PS, SBS, PET, PHB, PLA	-	-

5.1.2 Zusatzstoffe (Additive)

Abgesehen von einigen wenigen Polyethylen-Filmen im Bereich der Lebensmittelverpackungen können die meisten Polymer-Rohstoffe nicht alleine alle an sie gestellten technologischen Anforderungen erfüllen. Zur Verbesserung ihrer Eigenschaften und Verarbeitbarkeit werden die Polymere üblicherweise mit Zusatzstoffen versehen. Erst durch die Einarbeitung der Zusatzstoffe in die Polymer-Rohstoffe entsteht der Werkstoff Kunststoff. Dieser Prozess wird als Aufarbeiten bzw. Compoundieren bezeichnet. Beim Compoundieren werden zwischen 0,01 bis 50 M.-% Zusatzstoffe in die Polymer-Rohstoffe eingearbeitet und das Produkt anschließend homogenisiert und granuliert (Kaiser 2016). Zu den üblichen Prozessschritten zählen Mischen, Dispergieren und Kneten. Polymere können sowohl beim Polymer-Rohstoffhersteller als auch erst beim Verarbeiter additiviert werden.

Zusatzstoffe können entweder die Verarbeitbarkeit der Polymer-Rohstoffe (z.B. als Gleitmittel, Schmiermittel, Fließhilfen) oder die Eigenschaften bei der Anwendung verbessern. Die Verwendung von Zusatzstoffen ist immer mit Kosten und in manchen Fällen auch mit Nachteilen für das Produkt (z.B. schlechtere Recyclierbarkeit) verbunden.

Abhängig von der Art und eingesetzten Menge wirken sich Additive unterschiedlich auf die mechanischen, thermischen und elektrischen Werte sowie das Brandverhalten von Kunststoffen aus. Zu den üblicherweise im Kunststoffbereich eingesetzten Zusatzstoffen zählen:

- Füllstoffe
- Verstärkungsstoffe
- Gleitmittel, Antiblockmittel, Trennmittel
- Farbmittel
- Stabilisatoren zum Schutz gegen Einwirkung von Wärme, Sauerstoff, Ozon, UV-Licht
- Flammhemmende Zusätze
- Fasern
- Treibmittel
- Weichmacher (v.a. bei Elastomeren und bei PVC)

Für die Produktion von Verpackungsfolien und PET-Flaschen und in Hinblick auf den Einsatz von MNM sind v.a. Füllstoffe, Stabilisatoren und Farbstoffe von Bedeutung.

Füllstoffe: Kunststoffe können bis zu 50% des Polymer-Rohstoffes an Füllstoffen enthalten. Füllstoffe werden häufig als Streckmittel eingesetzt, um Kunststoffmasse einzusparen, oder um besondere Eigenschaften (z.B. Formbeständigkeit) zu erzielen. In erster Linie werden anorganische Pulver (z.B. Kreide, Kaolin und Talk) eingesetzt. Füllstoffe sind im Polymer-Rohstoff unlöslich und nicht flüchtig. Sie verändern sich in der Applikation nicht. Zunehmend werden auch Nano-Füllstoffe, wie z.B. modifizierte Schicht-Silikate in nanoskaligen Verbundfolien (Nanokomposit-Folien) als Sauerstoffbarrieren für Lebensmittelverpackungen eingesetzt (Kaiser 2016).

Stabilisatoren: Kunststoffe reagieren empfindlich auf Wärme, Ozon, UV-Strahlung, mechanische Verformungen oder Witterungseinflüsse und unterliegen einem oxidativen Abbau durch die Freisetzung von freien Radikalen. Zum Schutz können dem Kunststoff UV-Stabilisatoren („UV-Absorber“; Zusatz bis zu 2%), Wärmestabilisatoren oder Antioxidantien (Zusatz von bis zu 0,3%) zugesetzt werden.

Farbmittel: Zur Färbung von Kunststoffen können sowohl anorganische als auch organische Pulverpigmente (für opake Einfärbungen) verwendet werden, die im Kunststoff unlöslich sind. In geringerem Ausmaß werden auch organisch lösliche Farbstoffe (für transparente Einfärbungen) eingesetzt (Azofarbstoffe) (Martens & Goldmann 2016). Der Anteil an Farbstoffen im Rohstoff-Polymer kann zwischen 0,5 und 2% liegen (Kaiser 2016). Der wichtigste Farbstoff in der Kunststoffindustrie ist Titandioxid, der schon in geringer Konzentration die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffs negativ beeinflusst (Abts 2014). Farbmittel

werden als Pulver oder Farbmittelkonzentrate („Masterbatches“ auf Basis des jeweiligen Kunststoffes in Form von Granulaten, Pasten oder Flüssigkeiten) zugesetzt.

Wie in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 beschrieben, können auch verschiedene Nanomaterialien den Kunststoffverpackungen zugesetzt werden. Sie können entweder als Zusatzstoffe in den Polymer-Rohstoff (Matrix) eingebracht werden (z.B. Füllstoffe aus Schichtsilikat oder als Farbstoff wie Titandioxid), oder als nanoskaliger Überzug auf die Kunststoffoberflächen (Siliziumoxid in PET-Flaschen) aufgebracht werden. Siliziumoxid-Beschichtungen in PET-Flaschen verbessern die Gasdichtigkeit erheblich und können anstelle der vielfach für Saftflaschen verwendeten Multilayer-, Blend- oder Scavenger-Additive eingesetzt werden. Dadurch, dass die Beschichtung mittels Lauge im Recycling-Prozess abgelöst werden kann, ist eine Recyclingfähigkeit auch gegeben.

Werden klassische Füllstoffe durch Nano-Füllstoffe (z.B. Nanoclay aus Schichtsilikaten, wie z.B. Kaolin, Montmorillonit) substituiert, reichen wesentlich kleinere Mengen (ca. Faktor 10) an Füllstoff aus, um die Eigenschaften der konventionellen Füllstoffe zu erreichen. Ein geringer Anteil an Füllstoffen bedeutet, dass weniger Nebenprodukte in der Polymermatrix vorhanden sind, und der Kunststoff leichter verarbeitbar ist. Schicht-Silikate erhalten zunehmend Bedeutung in Nanokomposit-Folien (Kaiser 2016).

Im Abschlussbericht der Themengruppe 2 der Nanokommission (Ökopol 2010) wurde die Anwendbarkeit der Kriterien zu den Nutzen- und Risikoaspekten von Nanomaterialien exemplarisch an PET-Flaschen mit nanoskaligem Titannitrid (TiN) getestet, einem Produkt, das von einem Rohstoffhersteller in Asien produziert wird und sich schon 2010 auf dem Markt befand und auch in Österreich eingesetzt wird. Wird nanoskaliges Titannitrid als sogenanntes „re-heat additive“ dem PET-Kunststoff zugemischt, kann der Kunststoff rascher und energieeffizienter erwärmt und dadurch leichter in die endgültige Flaschenform gebracht werden. Die Autoren schätzen den Marktanteil von PET-Flaschen mit „reheat additives“ auf 30%.

Obwohl es viele Möglichkeiten des Einsatzes von Nanomaterialien in PET-Flaschen und Kunststoffverpackungen gibt, vermuten die interviewten ExpertInnen, dass Nanomaterialien derzeit nicht so häufig für Kunststoffanwendungen eingesetzt würden, weil derzeit die Erwartungen an sie nicht immer erfüllt würden, und daher für die Recycler nicht bemerkbar seien. Nichtsdestotrotz muss man davon ausgehen, dass nicht unwesentliche Mengen an nanomaterialhaltigen PET-Getränkeflaschen und Verpackungskunststoffen in den Abfallströmen landen (vergl. Kapitel 3.1).

5.2 Verwertung von Kunststoffen

Ob und wie Kunststoffe recycelt werden können, hängt in erster Linie von der Kunststoffsorte und der Sortenreinheit des Abfallstromes, bei Kunststoffmischungen und -verbunden von der Zusammensetzung, sowie von den in die Matrix eingebundenen Zusatzstoffen (Füllstoffen, etc.) und dem angewendeten Verfahren ab.

Zur Identifizierung von Kunststoffen wurde ein standardisiertes Codierungssystem für die häufigsten Kunststoffsorten eingeführt. Der Code besteht aus einem dreieckigen Symbol (drei Pfeile) und einer zweistelligen Nummer, die das Material ausweist. In vielen Fällen wird darunter auch noch das genormten Kurzzeichen der Werkstoffgruppe angegeben. Diese Kennzeichnung zielt darauf ab, das Sammeln und Sortieren für das Recycling zu erleichtern, insbesondere wenn Altkunststoffe sortenrein wiederverwertet werden sollen. Die ÖNORM EN ISO 11469: 2017 01 15 gibt eine weitergehende Spezifizierung der Recyclingzeichen („Kunststoffe - Sortenspezifische Identifizierung und Kennzeichnung von Kunststoff-Formteilen (ISO 11469:2016)“).

Es gibt derzeit noch keine Ausweisung von nanoskaligen Inhaltsstoffen.

Aufgrund ihrer unvernetzten Makromoleküle lassen sich sortenreine Thermoplasten oder thermoplastische Elastomeren sehr gut verwerten. Bei ausreichender Wärmezufuhr können sie eingeschmolzen und neu geformt werden. Duromere und Elastomere hingegen sind aufgrund ihrer vernetzten Molekülstruktur nicht plastisch verformbar. Abfall kann nur zerkleinert und als Füllstoff werkstofflich verwertet werden (Kranert 2017). Fraktionen mit gemischten Kunststoffen können auch chemische Unverträglichkeiten aufweisen, d.h. die Gemenge können weder gemischt noch verarbeitet werden. Kunststoffgemische bilden aufgrund der unterschiedlichen Schmelztemperaturen ihre Polymer-Grundgerüste meist keine homogenen Schmelzen, was sich negativ auf Verarbeitung und mechanische Eigenschaften der Recyclate auswirkt.

Sortenreine Thermoplasten können theoretisch unbegrenzt eingeschmolzen und durch die üblichen Verarbeitungsmethoden des werkstofflichen Recyclings wieder neu geformt werden. Die Polymer-Makromoleküle unterliegen durch Verarbeitung, Lagerung und Gebrauch aber einem oxidativen Abbau durch die Einwirkung von Luftsauerstoff, Wärme, Licht, und plastischen Verformungen. Jedes Aufschmelzen bringt eine thermische Zersetzung mit sich, die sich in einer Verfärbung des Produkts und einer Veränderung bzw. Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften bemerkbar macht. Durch die Verschlechterung der Sekundärwerkstoffe können die Endprodukte der Recyclingverfahren (Recyclate) nur noch für niederwertigere Produkte (Downcycling) eingesetzt werden. Durch Zusetzen von Füllstoffen und anderen Additiven können die Recyclate jedoch nachstabilisiert werden und Produkte

(Regranulate) mit akzeptabler Qualität erhalten werden (Abts 2014). Die meisten Kunststoffe lassen sich ca. 3-5 Mal recyceln, wobei häufigere Recyclingdurchgänge prinzipiell auch nicht ausgeschlossen werden können (Kranert 2017). Da sich die Eigenschaften von Recyclaten im Allgemeinen von denen des Ausgangspolymers unterscheiden, werden sie oft mit Neuware gemischt, um bestimmte Spezifikationen zu erfüllen.

Daneben können in Hinblick auf das Recycling auch folgende Probleme auftreten, die das Recycling von Altkunststoffen im (werkstofflichen) Recycling nicht immer erlaubt (Martens & Goldman 2016):

- Kleine Kunststoffprodukte lassen sich kaum wirtschaftlich sammeln und wiederverwerten (z.B. Folienfragmente).
- Die sortenreine Trennung bzw. Sortierung der einzelnen Kunststoffsorten ist aufgrund ihrer Vielzahl schwierig.
- Die Identifizierung der Sorten und Zusatzstoffe ist technisch kompliziert.
- Viele Produkte bestehen aus Verbundwerkstoffen, die sich aus unterschiedlichen Kunststoffen oder Kunststoffen mit anderen Werkstoffen wie Metall oder Papier (besonders im Verpackungsbereich) zusammensetzen. Die Trennung ist schwierig bzw. manchmal unmöglich.
- Kunststoffe aus dem Abfallstrom sind oft mit Anhaftungen oder Restinhalten versehen, die die Wiederverwertung beeinträchtigen, weil die Abtrennung von Verunreinigungen oder Zusätzen nur beschränkt möglich ist.
- Viele Kunststoffe sind eingefärbt oder enthalten Additive (z.B. Flammschutzmittel, Weichmacher), die nicht auf natürliche Weise abgebaut werden und eine Belastung darstellen.

Während Produktionsabfälle meist schon beim Hersteller verwertet werden (In-house Recycling), können post-consumer Kunststoffabfälle je nach vorliegender Sortenreinheit werkstofflich, rohstofflich oder energetisch/thermisch verwertet werden (Abbildung 3).

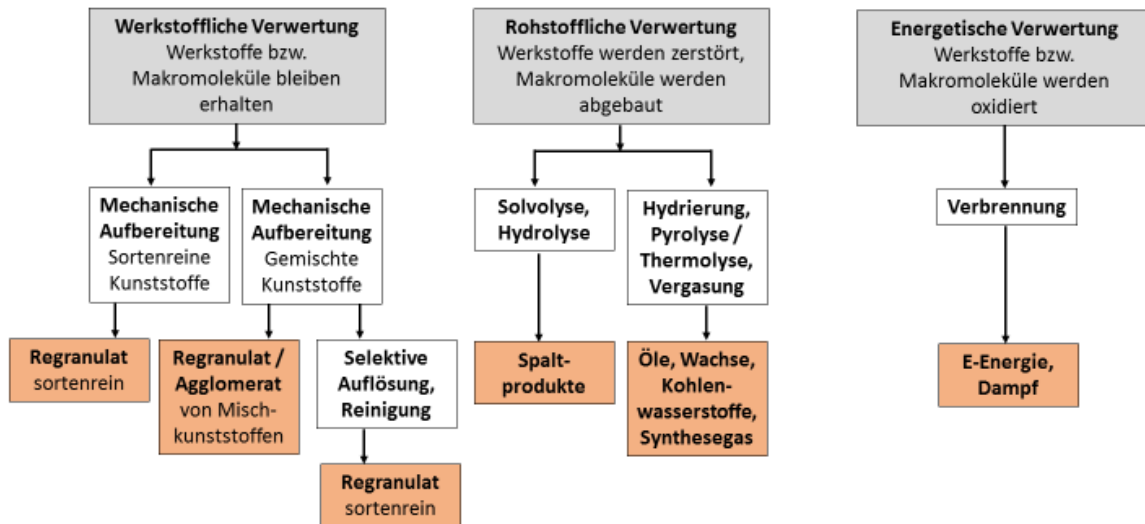


Abbildung 3: Verfahrenswege der Kunststoffverwertung (Quelle: Martens & Goldmann 2016)

Laut der Definition des österreichischem Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (§ 2 Abs. 5 Z 7 AWG 2002) versteht man unter Recycling „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Produkten, Sachen oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.“

Aufgrund dieser Definition wird im Folgenden – nach einer kurzen Einführung zur werkstofflichen, rohstofflichen und thermischen Verwertung – hauptsächlich auf die werkstoffliche Verwertung Bezug genommen.

5.2.1 Werkstoffliche Verwertung („Mechanisches Recycling“)

Das werkstoffliche Recycling zielt auf die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Kunststoffabfälle ab. Die Ausgangsmaterialien (v.a. Thermoplasten) werden umgeformt, ohne dass dabei die verwendeten Stoffe chemisch verändert werden (d.h. die makromolekulare Struktur der Polymere bleibt erhalten) und die Werkstoffeigenschaften verloren gehen. Voraussetzung für diese Art der Verwertung ist, dass die Ausgangsmaterialien eine hohe Sortenreinheit haben. Die Sortenreinheit kann man erhöhen, indem die Altkunststoffsammlung möglichst sortenrein umgesetzt wird bzw. durch eine nachgelagerte Sortierung in den Sortieranlagen und in den Recyclingbetrieben.

In diesem Prozess ist es derzeit technisch nicht möglich spezifische Zusatzstoffe (wie z.B. MNM) zu identifizieren.

In Österreich werden – abgesehen von thermischer Verwertung und einer Pilotanlage der OMV für das chemische Recycling – Kunststoffabfälle ausschließlich einem werkstofflichen Recycling zugeführt.

Die Verwertungskette des werkstofflichen Recyclings besteht im Wesentlichen aus 4 Stufen:

- Sammlung und Sortierung
- Vorbehandlung
- Mechanische Aufbereitung
- Herstellung von Werkstoffen

Für den Prozess des werkstofflichen Recyclings von Kunststoffabfällen ist auch relevant, ob die Regranulate für den Lebensmittelbereich, z.B. als Lebensmittelkontaktmaterialien, eingesetzt werden sollen und dementsprechend aufbereitet werden müssen. Derzeit können Lebensmittelkontaktmaterialien nur aus PET-Granulaten (d.h. aus PET-Flaschen) und nicht aus Folien-Granulaten hergestellt werden. Aufgrund nicht auszuschließender Verunreinigungen von Verpackungsfolien, können aus deren Regranulaten keine lebensmitteltauglichen Produkte hergestellt werden.

Die Sammlung von Kunststoffverpackungen ist je nach Abfallverband und teilweise auch innerhalb eines Verbandes unterschiedlich organisiert. In Österreich gibt es derzeit sieben Sammel- und Verwertungssysteme, die von Herstellern²¹ und Gemeinden für die Sammlung, wie von der Verpackungsverordnung vorgesehen, beauftragt werden. Die Sammelsysteme regeln die Organisation der Sammlung, d.h. die Art und Weise der Sammlung und Sortierung der Altstoffe sowie die Zusammensetzung der unterschiedlichen Sammelfraktionen (z.B. Kunststoffverpackungen mit oder ohne Metall). Sie beauftragen unter anderem auch die Entsorger. Zwischen den Systemen gibt es immer wieder Unterschiede in den Sammlungen der Kunststoffe: einerseits darin, welche Abfallgruppen miteinander vermischt werden dürfen und andererseits in der Art der Sammlung.

Es kommen sowohl Sammelbehälter (in dichter verbauten Gebieten oder an ausgewählten Sammelpunkten) oder der „Gelbe Sack“ zum Einsatz. Dabei werden regional unterschiedliche Fraktionen gesammelt:

²¹ Jeder Unternehmer, der in Österreich Verpackungen in Verkehr bringt, obliegt dem Geltungsbereich der Verpackungsverordnung 2014 (VVO - BGBl. II Nr. 184/2014). Das Ziel der VVO, ist die Wiederverwendung und Vermeidung von Verpackungsabfällen bzw. die Vorbereitung zur Wiederverwendung und Verwertung zu fördern. Jeder „Primärverpflichtete“ gemäß § 8 (d.h. Hersteller und Importeure von Serviceverpackungen, Abpacker und Vertreiber von Verpackungen sowie Versandhändler aus dem Ausland, die an österreichische Letztverbraucher liefern) muss jedenfalls für Haushaltsverpackungen ein Sammel- und Verwertungssystem in Anspruch nehmen. <https://www.wko.at/service/umwelt-energie/information-verpackungsverordnung.html>

- nur Plastikflaschen (Hohlkörper), z.B. bis 2018 in Wien, seither gemeinsam mit Getränkekartons
- Plastikflaschen und andere Kunststoffverpackungen
- Zusätzliche Mitsammlung von Metallverpackungen

Auch eine Abgabe an Abfallsammelzentren ist zumeist möglich, wo z.B. eine getrennte Sammlung in Containern, Big Bags oder Gitterboxen für HDPE /PP Hohlkörper, PET-Flaschen, LDPE-Folien natur und unbedruckt, PE-Folien Gemisch, EPS (ohne Fleisch- und Gemüsetassen, keine Chips) angeboten werden kann. In Österreich gibt es bei der Abfallsammlung keine Trennung zwischen Lebensmittel- und Waschmittelflaschen.

Aufgrund des gemeinsamen Sammelns von verschiedenen Fraktionen oder jedenfalls durch Fehlwürfe (v.a. Restmüll) ist eine anschließende Sortierung notwendig, um einzelne Stoffgruppen soweit anzureichern, dass sie als Werkstoffkonzentrat für Recyclingprozesse verwendet werden können. In Österreich gibt es ca. 15-16 Sortieranlagen. Dabei handelt es sich um eigenständige Unternehmen, die sich auf das Sortieren der Verpackungen spezialisiert haben, und von den Sammelsystemen dafür beauftragt werden. Die sortierten Fraktionen (z.B. nach Farbe sortierte PET-Flaschen oder PE-Folien) werden den Sammelsystemen wieder zur Verfügung gestellt und von ihnen vermarktet. Dadurch sorgen sie wieder für eine entsprechende Verwertung. Sortieranlagen zielen hauptsächlich auf verwertbare Mengen des Materials ab, z.B. Sammelmenge an PET oder Polyolefinen (z.B. PE, PP). Anhaftungen von Schmutz an den Altkunststoffen oder Restinhalte sowie Biokunststoffe spielen beim Sortieren derzeit keine Rolle, obwohl diese gerade für nachgelagerte Recyclingprozesse problematisch werden können. Aufgrund fehlender Kennzeichnung werden nanomaterialhaltige Kunststoffabfälle derzeit nicht getrennt gesammelt, sondern landen im regulären Abfall.

Kenntnis über die Zusammensetzung der Abfälle und Sortenreinheit in Bezug auf die Kunststoffe ist eine wesentliche Voraussetzung für ein erfolgreiches werkstoffliches Recycling.

In Abhängigkeit vom Inputmaterial (Herkunft, Zusammensetzung, Anteil der Störstoffe, Lebensmittelzulassung der Fraktion) reicht die Ausstattung von Sortieranlagen von relativ simplen Anlagen mit händischer Sichtung/Sortierung, Siebtrennung, Zerkleinerung, Magnetabscheidung, Waschung, Trocknung bis hin zu Aufbereitungsanlagen mit mehrstufiger Zerkleinerung und mehrstufiger Trennung (Schwimm-Sinkverfahren, Windsichtung, elektrostatische Fremdkunststofftrennung, Siebstufen, Wirbelstromabscheidung), mehreren Wasch- und Trocknungsvorgängen, Entstaubung, Homogenisierung oder auch automatische Sortierungen mit Hilfe verschiedener Sensoren und Detektoren wie z.B. Nahinfrarotspektroskopie. Im Anschluss daran werden die sortierten Fraktionen im Falle des Transports zu einer Verwertungs- oder Entsorgungsanlage balliert.

Neben den in Österreich gesammelten und sortierten Altkunststoffen als Ausgangsstoff für das Recycling kaufen österreichische Recycler auch immer mehr Ware aus dem europäischen und internationalen Ausland zu. Das ist notwendig, weil der Bedarf aller Kunststoffrecyclinganlagen an Altkunststoffen vom österreichischen Markt nicht mehr abgedeckt werden kann, um die Recyclinganlagen auszulasten. Obwohl Abfallfraktionen aus dem Ausland stichprobenartig auf ihre Zusammensetzung analysiert werden, kann beim Import von ausländischen, im speziellen außer-europäischen Altkunststoffen nicht immer ausgeschlossen werden, dass in Europa nicht zugelassene Zusatzstoffe (wie z.B. MNM) in den österreichischen Kunststoffkreislauf gelangen.

Derzeit investieren Recyclingbetriebe sehr stark in die Nachsortierung, weil davon die Qualität der Endprodukte abhängen. Das betrifft z.B. die farbliche Sortierung. Während es bei PET-Flaschen nur wenige Farben gibt (z.B. natur, blau und grün) und die Farbsortierung dort schon sehr gut funktioniert, spielt die Farbsortierung bei anderen Kunststoffen (z.B. PE, PP) trotz des großen vorhandenen Farbspektrums kaum eine Rolle. Das liegt v.a. daran, dass die Sortierung bestimmter Fraktionen von den möglichen Abnahmemengen beeinflusst wird.

5.2.2 Rohstoffliche Verwertung („Chemisches Recycling“)

Wie bei der werkstofflichen Verwertung wird bei der rohstofflichen Verwertung ebenfalls die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Kunststoffabfälle angestrebt. Hier werden jedoch die Polymermakromoleküle der Kunststoffe durch chemische Verfahren (Hydrierung, Pyrolyse oder Hydrolyse) in niedermolekulare Stoffe aufgespalten. Die Stoffe können anschließend energetisch oder chemisch eingesetzt werden. In Raffinerien können solche niedermolekularen Stoffe als Ausgangsstoffe für Treibstoffe eingesetzt werden. Die OMV hat im Rahmen des Projekts „ReOil“ (Projektstart 2013) eine Pilotanlage entwickelt und in der Raffinerie Schwechat in Betrieb genommen, in der aus Kunststoffabfall Rohöl gewonnen wird.²² In einer ersten Stufe konnten in der ReOil-Anlage pro Stunde aus 100 kg Kunststoffabfall 100 Liter synthetisches Rohöl erzeugt werden. Das Verfahren soll in Zukunft weiter ausgebaut werden, um dann bis zu zwei Tonnen Plastikmüll pro Stunde in Rohöl umwandeln zu können. Das Verfahren kann für Kunststoffe wie Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol (Styropor) eingesetzt werden.

Eine Anwendung der niedermolekularen Stoffe als Ausgangsstoff für neue Kunststoffe ist derzeit noch unwirtschaftlich. Sortenreine Thermoplaste lassen sich aber mittels rohstofflichen Recyclings für bestimmte Gebrauchsgegenstände, wie z.B. Polyester-Fleecematerialien weiterverarbeiten (Abts 2014). Beim chemischen Recycling von PET-Abfällen erfolgt die Depolymerisation des Polymergrundstoffs in Monomere durch mehrere Schritte: Glycolyse, Methanolyse, Hydrolyse, und andere Prozessschritte wie Aminolyse bzw. Ammonolyse (López-Fonseca 2010).

²² <https://www.omv.com/de/blog/reoil-aus-kunststoff-wieder-oel-gewinnen> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Aufgrund der zunehmenden Zahl an Zusatzstoffen und mangelnder Sortenreinheit bei der Abfallsammlung, die bei der Kunststoffproduktion eingesetzt werden, schätzen ExpertInnen, dass in Zukunft das chemische Recycling einen höheren Stellenwert beim Kunststoffrecycling einnehmen wird, vor allem bei Materialien, bei denen thermo-mechanische Recyclingmethoden nicht zielführend sind. Derzeit gibt es – auch aufgrund der hohen Kosten – nur einige wenige Recyclinganlagen in Europa, die chemisches Recycling für Kunststoffe betreiben. Das Ergebnis des chemischen Recyclings wäre ein weitgehend reiner Kunststoff, den man wieder für alle ursprünglichen Anwendungen des Ausgangskunststoffes einsetzen könnte.

In Hinblick auf nanoskalige Zusätze zum Grundpolymer kann man derzeit nicht abschätzen, ob sie Auswirkungen, und wenn ja, welche, auf die Verfahrensprozesse beim chemischen Recycling hätten.

Beim chemischen Recycling werden Nanomaterialien auch als Katalysatoren eingesetzt, um beispielsweise die Glykolyse zu beschleunigen (Alzuhairi et al. 2017).

Da das rohstoffliche (chemische) Recycling derzeit für Österreich aber von geringer Relevanz ist, wird im Folgenden nicht weiter darauf eingegangen.

5.2.3 Thermische Verwertung (energetische Nutzung)

Inhomogene Kunststoffabfällen (Mischkunststoffen) können oft nur thermisch verwertet werden. Aufgrund ihres hohen Heizwertes werden die Kunststoffabfälle als Ersatzbrennstoffe z.B. in Hochöfen in der Stahlindustrie, Zementwerken oder Müllverbrennungsanlagen eingesetzt (Abts 2014), um die in den nicht anders verwertbaren Materialien enthaltene Energie in Form von Strom, Fernwärme oder Prozessenergie zu nutzen. Beispielsweise führt Österreichs größte Sortieranlage für Kunststoffverpackungen (Betreiber: Saubermacher Dienstleistungs AG am Standort Graz-Puntigam) ca. 40% des Output-Materials (bei einer jährlichen Sortierkapazität von 32.000 t) der Zementindustrie als Ersatzbrennstoff zu.²³

Laut ARA Altstoff Recycling Austria werden in mehreren Bundesländern (Wien, NÖ, OÖ, Salzburg und Kärnten) kleinteilige Kunststoffverpackungen im Restmüll gesammelt und in Müllverbrennungsanlagen verbrannt²⁴. Die dabei freigesetzte Energie wird in kommunalen Einrichtungen genutzt und in Fernwärme-Netze eingespeist.

Bei thermischen Verfahren wird der Abfall für eine bestimmte Zeit einer hohen Temperatur ausgesetzt, wobei verschiedene physikalisch-chemische Prozesse ablaufen (Trocknung,

²³ <https://eu-recycling.com/Archive/20727> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

²⁴ <https://www.ara.at/kreislauf-wirtschaft/verpackungsrecycling/kunststoffverpackungen/> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung). Bei den meisten Verfahren wird der Kunststoffabfall in überstöchiometrischer Luftatmosphäre oxidiert, d.h. verbrannt (Kranert 2017). Solche Verbrennungsverfahren bestehen üblicherweise aus einem thermischen Hauptverfahren, einer Wärmenutzung und einer mehrstufigen Rauchgasreinigung (Kranert 2017).

Darüber wie sich Nanomaterialien bei Verbrennungsprozessen, z. B. in Müllverbrennungsanlagen, verhalten, ist noch wenig bekannt (Holder et al. 2013). Nanomaterialien können bei Verbrennung entweder zerstört (z.B. Carbon Nanotubes zu CO_2), durch das Rauchgasbehandlungssystem (z.B. Metalloxide) eingefangen, umgewandelt (z.B. CaCO_3 bis CaO und CO_2 oder $\text{ZnO} + \text{HCL}$ ergeben $\text{ZnCL}_2 + \text{H}_2\text{O}$), in kleinere (Nano-)Partikel zerfallen, die Verbrennungsanlage unverändert verlassen oder zu größeren Partikel agglomerieren und dadurch ihren Nano-Satus verlieren (Working Party on Resource Productivity and Waste 2013).

Je nach Zusammensetzung können sich die Nanomaterialien dabei physikalisch oder chemisch verändern und sich in der Schlacke oder Flugasche anreichern; sie können auch die Bildung oder Zerstörung von Verbrennungsnebenprodukten katalysieren (Holder et al. 2013). In Versuchen, in denen Nanopartikel (z.B. Titanoxid) gezielt in Feuerungen zugesetzt wurden, konnten diese wieder in den festen Verbrennungsrückständen (wie z.B. Rostasche) gefunden werden (Baran 2017).

Die Working Party on Resource Productivity and Waste (2013) empfiehlt daher, dass Abfallverbrennungsanlagen mit einem Rauchgasbehandlungssystem ausgestattet sein sollen, um die Mehrzahl an MNM vom Behandlungssystem erfassen zu können und alle Verbrennungsparameter (z.B. Temperatur, Verweilzeit oder Sauerstoffgehalt) so einzustellen, dass ein Großteil der MNM zerstört werden können.

5.3 Recycling von PET Flaschen

In Österreich (und in der EU) werden Kunststoffe hauptsächlich mit einem thermo-mechanischen, werkstofflichen Recycling aufbereitet.

Das Recycling von PET-Getränkeflaschen funktioniert in Österreich sehr gut, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass Sammlung und Sortierung genau auf diesen Stoffstrom abzielen und seit vielen Jahren Expertise in diesem Bereich aufgebaut werden konnte. In Österreich gibt es drei größere und einige kleinere Recyclingbetriebe, die PET-Getränkeflaschen für verschiedene Anwendungen aufbereiten (z.B. PET-Flaschen, Fasern, Verpackungsfolien, Umreifungsbänder). Sie haben schätzungsweise eine Gesamtverarbeitungskapazität von 120.000 bis 140.000 t PET-Material pro Jahr (Angabe laut

interviewtem Experten), was einem Vielfachen der in Österreich gesammelten PET-Flaschen entspricht. Derzeit liegt der Marktinput in Österreich bei ca. 42.000 – 45.000 t PET-Flaschen, wobei davon nur etwa zwei Drittel, d.h. etwa 30.000 t, dem Recycling zur Verfügung stehen. Um die bestehenden Recyclinganlagen auslasten zu können, werden Abfallfraktionen aus dem Ausland zugekauft.

Als ein Beispiel für das Kunststoffrecycling werden die Verfahrensschritte für das PET–Recycling exemplarisch für die der Recyclinganlage der Firma PETtoPET in Müllendorf wie folgt beschrieben (PETtoPET, 2019).

Ursprung und Anlieferung der Altkunststoffe: Nach Farbe sortierte PET-Flaschen werden in Ballen (ca. 250 kg, rund 10.000 PET-Flaschen) an die Anlage geliefert. Etwa 50% des Rohmaterials werden aus dem Ausland zugekauft. Da die Sammelstrukturen und Sammelsystem sowohl in Österreich als auch im Ausland sehr unterschiedlich sein können, setzen sich die Altkunststoffe aus unterschiedlichen Fraktionen zusammen (z.B. aus gemischte Hausmüllsammelungen oder aus sehr sauberen Stoffströmen aus dem Pfandsystem).

Erste Nachsortierung: Die angelieferten Flaschen werden in zwei Stufen automatisch qualitätssortiert und danach noch einmal von MitarbeiterInnen begutachtet. Nicht-Getränkeflaschen bzw. Fremdstoffe werden händisch aussortiert. Rohmaterial aus dem österreichischen Markt ist normalerweise sehr gut vorsortiert (Anteil von ca. 98% PET-Getränkeflaschen in den Fraktionen), jede weitere Nachsortierung erhöht jedoch die Qualität des Endprodukts. Rohmaterial aus dem Ausland kann mit unterschiedlichen Qualitäten eingekauft werden, zum Teil besser als in Österreich (wenn das Material aus einer Pfandsystemsammlung kommt), zum Teil aber auch schlechter.

Zerkleinerung: Die PET-Flaschen werden in einer Mühle zerkleinert. Ab diesem Zeitpunkt werden die kleinen Teile als PET-Flocken bezeichnet.

Waschung: Die Flocken werden trocken und nass gereinigt. Mittels intensiver Waschung werden Verunreinigungen und Schmutz entfernt. Diese zerkleinerten und gewaschenen Flaschenteile werden als „washed flakes“ bezeichnet.

Zweite Nachsortierung: Die Flocken werden von Farb- und anderen Sortiermaschinen, die auch den Werkstoff erkennen können, mittels Spektrographie nachsortiert.

Trennung: Die Flaschenteilchen – eine Mischung aus Verschlusskappenteilchen (aus PE oder PP) und PET-Flocken – werden anschließend aufgrund ihres spezifischen Gewichtsunterschiedes voneinander mit Sinktrennverfahren getrennt und getrocknet, um eine hohe Stoffreinheit zu erzielen. In diesem Stadium eignen sich die Flocken schon für zahlreiche

Anwendungen in der Faser- und Folienindustrie, wo kein direkter Kontakt zu Lebensmittel gegeben ist.

Aufbereitung zu Lebensmittelkontaktmaterialien: Zur Aufbereitung der Materialien zu lebensmitteltauglichen Granulaten werden zwei unterschiedliche Verfahren eingesetzt: ein Verfahren produziert Flocken, das andere Granulate. Derzeit können nur PET-Flaschen (und keine Verpackungsfolien) zu lebensmitteltauglichen Granulaten recycelt werden.

Aufbereitungsprozess 1: Im patentierten URRC-Verfahren (United Resource Recovery Corporation) werden die Flocken nochmals gründlich und schonend gereinigt. Allenfalls enthaltene Aromastoffe werden mit einem Verfahren, bei dem die oberste Schicht der Flocken abgetragen wird, entfernt. Dabei werden ca. 1-2% des Materials verschliffen, um die größten Kontaminationen abzutragen. Die Flocken werden in einem speziellen Drehrohrofen auf 200°C erhitzt und tiefengereinigt. Durch das Erhitzen lösen sich die Molekülgitter des Polymers auf und zuvor eingedrungene Stoffe können leichter ausdiffundieren. In diesem Schritt kommt es zu einer thermischen Belastung des Werkstoffes, in dem unter Umständen auch Additive oder Polymerblends (d.h. eine Kunststoffmischung aus mindestens zwei Grundpolymeren) überlastet werden und sich gelblich verfärben.

Danach werden die Flocken wieder mit klarem Wasser gespült und getrocknet. Alle PET-Teilchen, die sich während der Aufbereitung verfärbt haben (ca. 1-2%), werden mit einem Farbsortiergerät aussortiert. Solche aussortierten Flocken werden für niederwertigere Anwendungen eingesetzt (z.B. Faser, Folien). Die transparenten Flocken sind in diesem Stadium schon lebensmitteltauglich. Der Vorteil der Flocken liegt darin, dass verfärbte Flocken maschinell heraussortiert werden können. Der Nachteil liegt darin, dass die Flocken von der Granulatform der Neuware abweichen und daher die Flocken schlecht mit der Neuware mischbar sind.

Aufbereitungsprozess 2: Beim Starlinger-Verfahren werden die gewaschenen und hochgetrockneten PET-Flocken so hoch erhitzt (ca. 260-280°C), bis sie flüssig werden. Die flüssige PET-Masse (Schmelze) wird im Extruder durch ein feines Sieb gepresst und zu kleinen, transparenten Granulatkörnern geformt. Um die benötigte lebensmitteltaugliche Qualität zu erreichen (EFSA 2013), erfolgt eine Tiefenreinigung im SSP Reaktor (Solid-State-Process).

In diesem Prozess würden Additive oder Polymerblends die gesamte Schmelze leicht gelblich verfärben. Um die Additive herauszubekommen, müssten chemische Verfahren eingesetzt werden. Im Normalfall werden die Verfärbungen kaschiert, indem Aufheller oder ein Blauton zum Überdecken des Gelbtönen der Schmelze zugesetzt werden. Das führt zu einer Abnahme der Transparenz und wirkt sich letztlich auf die Qualität des Granulats aus. Während die Qualität dieser Granulate zwar von jener der Neuware abweicht, ist ihre Mischbarkeit mit granulierter Neuware sehr gut.

Gelbverfärbungen könnten auch von MNM stammen (Sánchez et al. 2014). Derzeit werden MNM in keinem Schritt des Recyclingprozesses berücksichtigt.

Anwendung: Das Regranulat kann wieder für die gewünschten Applikationen eingesetzt werden, entweder in Reinform oder als Zusatz zu Neuware. Für eine Anwendung als PET-Flaschen werden beim Preform-Hersteller aus den Granulaten Vorformlinge (Preformen) im Spritzgussverfahren hergestellt, die zumeist von den Getränkeabfüllern im Streckblasverfahren bei der notwendigen Umformtemperatur zu Flaschen aufgeblasen werden. Hat man dem PET-Material zuvor stark wärmeabsorptive Substanzen (sogenannte „reheat additives“, z.B. nanopartikuläres Titannitrid) beigemischt, erwärmt sich das Material rascher und benötigt dafür weniger Energie (Ökopol 2010).

Zur Qualitätssicherung werden Recyclate üblicherweise stichprobenartig auf ausgewählte verarbeitungsrelevante Parameter untersucht (z.B. Schmelzflussindex, Bruchdehnung, Fließigenschaften). Die Additivierung von Recyclaten wird – sofern sie die Qualität des Endprodukts nicht beeinflusst – nicht gesondert untersucht. In geschlossenen Kreisläufen (z.B. PET-Flaschen) sind die in den Altkunststoffen enthaltenen Additive (inkl. MNM) normalerweise erwünscht, weil sie auch im Neuprodukt eingesetzt werden. Geht man in Materialanwendungen mit offenen Kreisläufen (z.B. Verpackungsfolien), ist man heute technisch noch nicht in der Lage, herausfinden zu können, was tatsächlich im Abfallmaterial enthalten ist. Aus Ressourcengründen wird normalerweise in den Recyclaten nur nach ausgewählten Inhaltsstoffen gesucht, die gezielt gefunden werden sollen (z.B. verbotene Inhaltsstoffe). Dies trifft besonders auf Bereiche zu, in denen die Ausgangsmaterialien downgecycelt werden (z.B. Regranulat aus Lebensmittelfolien wird für Baufolien oder Füllstoffe eingesetzt).

5.4 Recycling von Kunststoffverpackungsfolien

Horodytska et al. (2018) geben einen umfassenden Überblick über die Abfallwirtschaft von flexiblen Kunststofffolien. Für Kunststoffverpackungen werden hauptsächlich Polyethylen (LDPE und HDPE), aber auch Polypropylen und Polyethylenterephthalat eingesetzt. Hinsichtlich der Struktur der Verpackungsfolien kann man Monolayer- (Einschicht-) und Multilayer- (Mehrschicht-) Folien unterscheiden. Während Monolayer-Folien aus einer Schicht eines thermoplastischen Polymers bestehen, können sich Multilayer-Folien aus bis zu 17 Schichten zusammensetzen. Diese Schichten können sowohl Polymere als auch Nicht-Polymere (z.B. Papier, Aluminium) enthalten. Für Lebensmittelverpackungen werden hauptsächlich Multilayer-Folien verwendet.

Abfälle aus Kunststoffverpackungen werden hauptsächlich thermisch und werkstofflich verwertet.

Das werkstoffliche Recycling von Kunststofffolien läuft ähnlich jenem von PET-Flaschen ab, jedoch ohne die Schritte zur Aufbereitung zu lebensmitteltauglichen Recyclaten. Der Input-Abfallstrom besteht aus einer Kunststoffsorte (z.B. PE) oder einer Mischung aus kompatiblen Kunststoffen.

Der Ablauf der Folienaufbereitung wird von der Firma Ecoplast Kunststoffrecycling GmbH wie folgt beschrieben²⁵:

Ursprung und Anlieferung der Altkunststoffe: Folienabfälle werden von den Altstoffsammlern oder Sortierern in Ballen gepresst zum Recyclingbetrieb geliefert. Folien werden sowohl aus heimischen als auch ausländischen Betrieben bezogen und sind teilweise schon vorsortiert (z.B. Polyethylen). Folien von Kunststoffabfällen aus Industriebetrieben fallen meist in größeren Mengen an, sind sortenreiner und weniger verschmutzt (z.B. Wickelfolien von Paletten). Haushaltsabfälle sind dagegen heterogener, d.h. aus verschiedenen Kunststoffsorten, und stärker verschmutzt. Dadurch eignen sie sich weniger gut für werkstoffliches Recycling. Der Anteil von Lebensmittelkontaktfolien (mit möglicherweise nanoskaligen Materialien) im Abfallstrom kann je nach Fraktion zwischen 0 und 70% liegen (Annahme laut ExpertInnen).

Aufbereitung, Zerkleinerung und Vorwaschung: Die Ballen werden maschinell aufgelöst und zur Sortierstation verbracht, wo Nicht-Polyethylen und andere Störstoffe mit hohem Aufwand aussortiert werden (z.B. mittels Nahinfrarottechnologie). Die Kunststoffe (z.B. Polyethylen) werden vorzerkleinert und gelangen über eine Auflösesiebtrommel und ein Absinkbecken in die Waschmühle.

Haupttrennung und Reinigung nach dem spezifischen Gewicht: Zwei Waschtrommeln sowie eine Zentrifuge reinigen das Material gründlich. In Trenntankbatterien werden die Verunreinigungen und Fremdstoffe ausgeschieden und nur das aufschwimmende Polyethylen wird durch Paddelräder zur nächsten Verarbeitungsstufe weiterbefördert.

Trocknung und Vorbereitung auf die Extrusion: Die reinen Polyethylen -Schnitzel werden mechanisch und thermisch getrocknet und in einem Agglomerator zu krümeligen Kunststoffbröckchen zusammengeschmolzen. Diese Agglomeratbröckchen werden wieder zermahlen und in ein Vorlagesilo geblasen.

Extrusion und Qualitätsklassifizierung: Das zerkleinerte Agglomerat wird im Extruder bei ca. 200°C entgast und homogenisiert. Mittels Filtersieb werden feinste Schmutzpartikel entfernt, bevor die zähflüssige Kunststoffmasse wie „Spaghetti“ am Düsenkopf ausgepresst wird. Ein rotierendes Messer zerschneidet diese „Spaghetti“ in kleine Linsen, die in einem Wasserstrom

²⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=xUH2kQAE0WE> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

gekühlt werden und bis zur Freigabe durch die Qualitätssicherungsabteilung in Puffersilos zwischengelagert werden.

Anwendungen: Nachdem Kunststoffverpackungsfolien (Polyethylen, Polypropylen) derzeit aufgrund der Gesetzeslage nicht mehr zu lebensmitteltauglichen Folien aufbereitet werden können, erreichen Granulate aus Verpackungsfolien in der Regel nur Qualitäten für Downcycling-Anwendungen, wie z.B. Müllsäcke, Tragetaschen, Kunststoffbaufolien, Agrarfolien. Der maximale Anteil an Recyclaten in den Anwendungen kann je nach Anwendung bis zu 100% betragen.

Beim Recycling von Kunststoffverpackungsfolien können vielfache Probleme auftreten (Horodytska et al. 2018), z.B. durch Kontamination mit Additiven. Die Pigmente der Additive können bei den hohen Temperaturen während des Recyclingverfahrens als Prooxidantien (Substanzen, die die Oxidation einleiten oder fördern) bzw. als Prodegradantien wirken. Zusätzlich können unerwünschte Gerüche beim recycelten Produkt auftreten.

Seit einigen Jahren treten im Stoffstrom immer mehr Mehrschichtfolien auf. Diese Folien enthalten mehrere Kunststoffe (z.B. Polyethylen und Polyamid) im Schichtverbund, die beim mechanischen Recycling normalerweise nicht getrennt werden können und dadurch kaum bis gar nicht recycelt werden können. Während Beschichtungen aus Siliziumdioxid (SiO_2) oder Aluminiumoxid (Al_2O_3) auf PP, PE und PET recyclingfähig sind, gilt PET in Mehrschichtfolien als nicht recyclingfähig (FH Campus Wien 2019). Das Unternehmen APK AG bietet eine lösungsmittelbasierte Technologie (Newcycling®) an, die aus Mehrschichtverpackungen sortenreine Granulate erzeugen kann, die in Hinsicht ihrer Eigenschaften mit Neuware vergleichbar sind.²⁶

Ein weiteres Problem stellen die Farben, die auf die Folienoberfläche aufgebracht werden, dar, weil sie ebenfalls die Qualität des Endprodukts beeinträchtigen können. Während des Recyclingprozesses wird derzeit Carbon Black zugesetzt, um Vielfarbigkeit zu übertünchen. Es ist im Recycling bereits ein gängiges Additiv, um die Recyclingfraktion schwarz herzustellen.

Auch im Recyclingprozess von Kunststofffolien werden möglicherweise enthaltene MNM nicht speziell berücksichtigt – abgesehen von schwarzen und weißen Folien, die Carbon Black bzw. Titandioxid enthalten können. Diese Folien werden vom Abfallstrom abgetrennt und beispielsweise für schwarze Recyclate verwendet.

²⁶ <https://www.apk-ag.de/newcycling/> [Zuletzt abgefragt am 16.10.2019]

5.5 Nanomaterialien im Recyclingprozess

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, gibt es zahlreiche MNM, die in PET-Flaschen und Kunststoffverpackungen zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften eingesetzt werden können und deren Einsatz für Lebensmittelkontaktmaterial auch gesetzlich geregelt ist (sh. Kapitel 4.1).

Es ist zu erwarten, dass jeder Stoff, der einem Grundpolymer zugesetzt wird, nicht nur Auswirkungen auf die Eigenschaften des Grundpolymers hat, sondern auch einzelne Prozessschritte im Recycling beeinflussen kann. Andererseits können die thermischen und thermisch-mechanischen Prozesse, die während eines Recyclingprozesses auf das Grundpolymer und seine Zusatzstoffe einwirken, Auswirkungen auf beide (und ihre Materialeigenschaften) haben (Touati et al. 2011).

Es gibt jedoch kaum wissenschaftliche Studien, die das Verhalten von MNM in Recyclingprozessen untersuchen (z.B. Sánchez et al. 2014; Caballero-Guzman et al. 2015; Part et al. 2015b) bzw. die das Recycling von Nanomaterialien selbst behandeln. Insofern überrascht es nicht, dass die gängigen Recyclingverfahren (vergl. die Kapitel 5.2, 5.3 und 5.4) im Abfallstrom möglicherweise enthaltene MNM nicht gesondert berücksichtigen. Die nachfolgenden Kapitel fassen daher hauptsächlich die Einschätzungen von sechs KunststoffrecyclingexpertInnen (drei ExpertInnen aus Recyclingunternehmen und drei ExpertInnen aus dem F&E Umfeld im Bereich Kunststoffe und Recycling) zusammen. Im Folgenden werden sie als ExpertInnen bezeichnet.

Für eine wissenschaftliche Beurteilung des tatsächlichen Verhaltens und der Auswirkungen von MNM beim Recycling müsste das Verhalten von individuellen Nanomaterialien entlang der Verfahrenskette des Recyclingprozesses systematisch und mit einem entsprechenden datenbasierten und analytischen Studiendesign untersucht werden.

5.5.1 Problembewusstsein für Nanomaterialien in Recyclingprozessen

Alle interviewten ExpertInnen sind mit der Thematik Nanomaterialien vertraut und sind sich bewusst, dass bei der Handhabung und Verarbeitung von Nanomaterialien besondere Vorsichtsmaßnahmen zu beachten sind. Darüber, ob MNM aber tatsächlich, und falls ja, in welchem Umfang in den Abfallströmen von PET-Flaschen und Verpackungsfolien enthalten sind, herrscht weitgehend Unklarheit. Ein Experte bezweifelte, dass in den in Österreich eingesetzten PET-Flaschen überhaupt MNM eingesetzt würden. Er räumte jedoch ein, dass es nicht auszuschließen sei, dass Material, welches aus dem Ausland zugekauft würde, eventuell Nanomaterialien enthalten könnte. Ein Experte aus den Recyclingbetrieben vermutet, dass die meisten PET-Getränkeflaschen zu 99,9% aus reinem PET bestehen, dass aber in Hinblick auf

eine gewünschte Sauerstoffbarriere-Eigenschaft die Flaschen mit (evtl. nanoskaligen) Additiven oder Polymerblends modifiziert werden, um beispielweise sehr sensible Fruchtsäfte lagern zu können.

Die interviewten ExpertInnen aus den Recyclingbetrieben waren sich insgesamt kaum bewusst, dass Nanomaterialien auch in den von ihnen verarbeiteten Abfallströmen von PET-Flaschen und Verpackungsfolien vorkommen könnten. Mögliche nanoskalige Inhaltsstoffe in den Kunststoffabfällen und deren Auswirkungen auf den Recyclingprozess wurden bis dato nicht in ihren Betrieben thematisiert. Ein Interviewter war sich jedoch bewusst, dass manche im Recyclingprozess zugesetzten Farbstoffe, wie Titandioxid und Carbon Black, auch Nanopartikel enthalten (können). Diese Farbstoffe werden als Masterbatches (d.h. in Rohpolymer gebundene Farbkonzentrate) und nicht als Pulver der aufgeschmolzenen Polymermatrix des Rohmaterials zudosiert und werden daher nicht als problematischer als andere Zusatzstoffe eingestuft. Masterbatches werden vom Händler mit Sicherheitsdatenblättern geliefert, die über mögliche Risiken und Gefahren informieren.

Darüber hinaus haben die Recycler keine Information, ob sich Nanomaterialien in den von ihnen verarbeiteten Abfallströmen befinden. Die Betreiber der Sammel- und Sortieranlagen, die die Altkunststoffe an die Recyclingbetriebe liefern, informieren die Recycler im Wesentlichen nur über die Zusammensetzung der Fraktionen und die darin enthaltene(n) Kunststoffsorte(n). Information zu möglicherweise enthaltenen Nanomaterialien sowie auch anderen Additiven werden von der Sammelanlage nicht zur Verfügung gestellt. Allein von der Farbe der Kunststoffteile, z.B. bei strahlend weißen Kunststoffen oder schwarzen Kunststoffen, kann man vermuten, dass die Kunststoffteile (nanoskaliges) Titandioxid bzw. (nanoskaliges) Carbon Black enthalten können. Über die Zusammensetzung und die Menge gibt es aber keine Angaben. Je nach gewünschtem Endprodukt des Recyclingprozesses werden weiße und schwarze Kunststoffteile meist aussortiert (das gilt v.a. für das PET), weil sie in Hinblick auf die gewünschte Färbung des Endprodukts als Störstoffe betrachtet werden. Sie können aber für die Produktion von schwarzen Folien eingesetzt werden.

Die ExpertInnen der Recyclingbetriebe sahen die Interviews als Denkanstöße, sich mit der Problematik Nanomaterialien im Kunststoffabfall näher auseinanderzusetzen. Problembewusstsein zeigt sich v.a. in Hinblick auf den ArbeitnehmerInnenschutz, z.B. weil im Verarbeitungsprozess Kunststofffabriebe nicht ausgeschlossen werden können. Derzeit würden aber die Verfahren fehlen, um die möglicherweise in den Abfallfraktionen vorhandene Nanomaterialien vor Ort nachweisen und eine mögliche Exposition bewerten zu können.

Die forschungsnahen ExpertInnen waren im Alltag stärker mit der Thematik Nanomaterialien im Kunststoff konfrontiert und sich auch bewusst, dass (evtl. unbekannte) nanoskalige Zusatzstoffe theoretisch einen negativen Effekt auf die Verfahren beim Recycling haben

könnten. Konkrete Auswirkungen müssten aber erst im Detail und für die konkreten Substanzen untersucht werden.

Im F&E Bereich von Kunststoffprodukten wird bei der Anwendung von Nanomaterialien/Nanopartikel laut ExpertInnen immer mit besonderer Vorsicht umgegangen. Derzeit werden Nanopartikel laut ExpertInnen aber in einer relativ geringen Anzahl von Kunststoffprodukten eingesetzt, einerseits, weil die Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt noch nicht abschließend eingeschätzt werden kann und andererseits, weil der Einsatz von Nanopartikel, z.B. in Form von Nanofüllstoffen, in den zu entwickelnden Produkten bisher nicht immer die erwarteten Ergebnisse (Funktionalitäten) gebracht hätten und gleichzeitig die Kosten als zu groß eingeschätzt werden. Von Seiten der Kunden gibt es aber immer wieder Anfragen zu Nanomaterialien.

Nanofüllstoffe werden bei der Entwicklung gerne eingesetzt, weil sie bei wesentlich geringerer Einsatzmenge an Feststoffen sehr gute Eigenschaften aufweisen. Obwohl man im Labormaßstab mit Nanofüllstoffen immer wieder gute Erfahrungen gemacht hat, funktioniert das Upscaling auf Betriebsanlagengröße nicht immer, weil die Nanofüllstoffe nicht immer so gut funktionieren, wie angenommen. Im Normalfall wird bei der Materialentwicklung von Kunststoffen auch schon überlegt, ob und wie oft das neue Material im Sinne eines betrieblichen Recyclings auch im Kreislauf geführt werden kann bzw. was mit den entwickelten Produkten am Lebensende passiert.

Insgesamt wurden bisher Nanomaterialien nicht als problematisch für den Recyclingprozess wahrgenommen, v.a. weil derzeit andere Problembereiche für den Recyclingprozess als viel schwerwiegender und dringlicher eingeschätzt wurden (z.B. Sortenreinheit der Abfallfraktionen, Einsatz von Multilayer-Folien und anderen Verbundkunststoffen, Biokunststoffe in den Kunststofffraktionen, Verschmutzungen und Anhaftungen auf und in den Kunststoffverpackungen sowie unbeabsichtigt eingebrachte Stoffe (NIAS)).

5.5.2 Nachweis von MNM (Vorprüfungen / Vortests)

Um untersuchen zu können, ob Nanomaterialien in den Abfallströmen von PET-Flaschen und Kunststofffolien Auswirkungen auf den Recyclingprozess haben, müsste vorab geklärt werden, ob Nanomaterialien in Österreich tatsächlich in den genannten Abfallströmen vorkommen und in welchem Ausmaß.

Beim derzeit üblichen Ablauf von Recyclingprozessen haben Recyclingunternehmen keine Information darüber, ob sich in ihrem Ausgangsmaterial auch Nanomaterialien / Nanopartikel befinden.

Die Entsorger geben derzeit keine Information über Nanomaterialien in den Kunststoffabfallströmen an die Recyclingunternehmen weiter. In den Recyclingbetrieben selbst werden auch keine Untersuchungen durchgeführt, um festzustellen, ob Nanomaterialien im Altkunststoff enthalten sind. Derzeit wird nur stichprobenartig (entweder visuell oder von unabhängigen Prüfinstituten) untersucht, ob die gelieferten Kunststofffraktionen den Anforderungen entsprechen, d.h. ob die richtige(n) Kunststoffsorte(n) geliefert, ob der enthaltene Störstoffanteil dem geforderten Reinheitsgrad entspricht oder ob die Materialien auch für den geplanten Verwendungszweck passen. Im Rahmen einer Nachsortierung werden, je nach angestrebtem Endprodukt, weiße (mit Titandioxid versehene) oder schwarze (mit Carbon Black versehene) Kunststoffteile aussortiert.

Analysen der verarbeiteten Abfälle könnten Information über mögliche nanoskalige Inhaltsstoffe bringen. Es fehlen derzeit standardisierte Methoden und Verfahren, um Nanomaterialien qualitativ und quantitativ in Polymermatrices und Emissionen aus den Prozessen der Abfallwirtschaft zu messen (vergl. Kapitel 8). Sofern man nicht konkret weiß, welche Stoffe man nachweisen möchte, ist es aus Kostengründen schwierig, nicht zielgerichtete chemische Analysen durchzuführen. Im Normalfall werden Analysen daher nur in Hinblick auf gesetzlich regulierte Inhaltsstoffe durchgeführt.

Ein Experte eines Recyclingbetriebs erklärte, dass das Unternehmen plant, zukünftig auch in Analysemethoden für Zusatzstoffe zu investieren. Damit sollten v.a. auch ältere Materialien auf Additive (z.B. in Hinblick auf die nach REACH gelisteten besonders besorgniserregenden Stoffe (Substances of Very High Concern for Authorisation, SVHC)) untersucht werden können, um sicher zu stellen, dass sie den aktuellen Gesetzen entsprechen. Ob solche Analysemethode in Zukunft auch z.B. Nanofüllstoffe einschließen würden, steht noch nicht fest und würde von der Güte der verfügbaren Messmethoden abhängen. Um möglichst kosteneffizient zu arbeiten, werden die eingesetzten Materialien derzeit nur in Hinblick auf ihre geplante Verwendung, d.h. produktspezifisch, getestet. Recyclingunternehmen lassen Materialanalysen oft außer Haus durchführen, was größere Kosten verursachen kann. Inhouse Kompetenzaufbau kann diese Kosten verringern. Vor allem in Hinblick auf die vielfältigen post-consumer Abfälle sind regelmäßige Untersuchungen wichtig, um die vielen unterschiedlichen Eingangsströme bedienen zu können.

Bei der großen Vielfalt an Kunststoffen im Abfallstrom – wie sie bei gemischten Abfallfraktionen auftreten, bei denen sich z.B. jede Folie von der anderen bzw. jede Flasche eines Herstellers sich von den Flaschen eines anderen Herstellers unterscheiden kann – und den großen Mengen an Altkunststoffen, die tagtäglich verarbeitet werden, kann in den meisten Fällen nicht abschließend festgestellt werden, welche speziellen Inhaltsstoffe in einer Fraktion vorkommen. Nachdem jede Kunststofffraktion eine andere Zusammensetzung hat, ist es aus praktischen Gründen derzeit auch nicht möglich im Recyclingprozess auf Kriterien zu schauen,

die nicht auf die Separierung von nicht gewollten Stoffen aus dem regulären Strom abzielen. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um visuelle Untersuchungen. Beim Recycling von Verpackungsfolien wird beispielweise nur dahingehend unterschieden, ob sich die Ware um Low Density Polyethylen (LDPE), High Density Polyethylen (HDPE), bzw. Linear Low Density Polyethylen (LLDPE) bzw. die enthaltenen nicht gewollten Störstoffe. Tiefergehende Untersuchungen in das LDPE werden z.B. in Hinblick auf stark mit Kalk angereicherte Agrarfolien gemacht, weil solche Folien für das Recycling unbrauchbar sind.

Ob Nanopartikel / Nanomaterialien in Abfallströmen enthalten sind, könnte man nur indirekt folgern. Wenn z.B. das Material eine gewisse Eigenschaft aufweist, der Füllstoffanteil aber sehr niedrig ist, kann man daraus schließen, dass es ein Nanomaterial ist.

Recyclingbetriebe testen auch ihre Recyclate. Dabei wird untersucht, ob die Inhaltsstoffe der Recyclate den gesetzlichen Vorgaben entsprechen oder irgendwelche Kontaminationen enthalten sind. Im Lebensmittelbereich definieren die großen Hersteller von Kunststoffverpackungen manchmal strengere, als die gesetzlich vorgegebenen, Standards in Hinblick darauf, welches Material und welche Prozesse zugelassen werden und welche Werte (z.B. für Aromastoffe) bei Recyclaten eingehalten werden müssen. Daneben geht derzeit der Trend auch dahin, Analysemethoden für Indikatorsubstanzen von unbeabsichtigt eingebrachten Stoffen (Non Intentionally Added Substances (NIAS)) zu entwickeln. Es werden keine spezifischen Untersuchungen in Hinblick auf das Vorhandensein von Nanomaterialien gemacht.

5.5.3 Auswirkungen von MNM auf den Recyclingprozess

Wesentliche Voraussetzung für einen funktionierenden Recyclingprozess von Kunststoffen ist, dass der Recyclingprozess störungsfrei abläuft und das Endprodukt ein gutes Verarbeitungsprofil aufweist und für die nachfolgenden Verarbeitungsprozesse gut verarbeitbar ist (z.B. Spritzgießen, Extrudieren von Folien oder auch Schäumen). Recyclingbetriebe richten daher ihren Fokus in der technologischen / verfahrenstechnischen Weiterentwicklung von Recyclingprozessen vor allem darauf aus, eine möglichst hohe Qualität des Recyclats (z.B. Granulat) mit den für die geplante Applikation gewünschten Eigenschaften zu erzeugen.

Nanomaterialien könnten als Additive, Füllstoffe, und Beschichtungen bzw. in Form von Lagen von Multilayer-Folien in Kunststoffen auftreten und damit in den Recyclingprozess gelangen. Obwohl es viele Studien zu Lebenszyklusanalysen, Risikobewertung und potenziellen Auswirkungen von Nanomaterialien auf die Umwelt gibt, gibt es kaum Fachliteratur zu den Auswirkungen von Nanomaterialien in PET-Flaschen und Verpackungsfolien (Nanokomposit-Folien) auf den Recyclingprozess bzw. auf ihre Recyclierbarkeit.

Caballero-Guzman et al. (2015) modellierten die Materialströme von Metall-Nanopartikel (Nano-TiO₂, Nano-Nano-Ag) aus Konsumgütern im Recyclingsystem der Schweiz. Die Modelle zeigten, dass ein Großteil der nanomaterialhaltigen Abfälle ordnungsgemäß behandelt wird, aber v.a. verbrannt bzw. deponiert wird, weil die nanomaterialhaltigen Materialien meist nur einen geringen wirtschaftlichen Wert haben. Kleinere Fraktionen wurden auch ins Ausland versendet, wo sie weitere Recovery-Prozesse durchliefen. Nachdem TiO₂-Nanopartikel, ZnO-Nanopartikel und Ag-Nanopartikel während des Recyclingprozesses nicht zurückgewonnen werden, kann ein geringer Anteil der nanomaterialhaltigen Abfälle auch in den Produktionsprozess zurückfließen. Dies trifft jedoch nur auf wenigen Sektoren zu (z.B. Bauschutt, Kunststoffe). Insgesamt führen Recyclingprozesse weder zu einer signifikanten Verbreitung von MNM in neue Produkte noch in die Umwelt.

Touati et al. (2011) testeten die Auswirkungen von mit Montmorillonit verstärktem PP auf die Wiederaufbereitungszyklen und stuften die Recyclingfähigkeit dieses Materials als eher komplex ein, weil Recycling die Leistung der Nanokompositen hinsichtlich der Struktur und damit der mechanischen Eigenschaften des Materials stark beeinträchtigt. Sie fanden einen deutlichen Rückgang von thermischen und mechanischen Leistungen bei PP-Nanoton-Kompositen im ersten Aufbereitungsschritt.

Reijnders (2014) und darin zitierte Autoren stellten fest, dass das Recycling die Qualität thermoplastische Nanokompositen in Hinblick auf Kettenspaltung, Vernetzung, Abbau der Grenzflächen zwischen Nanopartikeln und Polymer negativ beeinflusst und das Auftreten von Kavitation fördert. Es wurde auch beobachtet, dass sich durch die Wiederaufbereitung von thermoplastischen Nanokompositmaterialien die mechanischen Eigenschaften des Materials verschlechterten.

Sánchez et al. (2014) untersuchten in einem experimentellen Setting die Auswirkungen von vier Nanomaterialien (Schichtsilikat Nanoclay, Calciumcarbonat (CaCO₃), Silber (Ag) und Zinkoxid (ZnO)) im Grundpolymer von Folien aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyethylenterephthalat (PET) auf den Extrusionsprozess in unterschiedlichen Recyclingszenarios. Ziel der Studie war es, die Auswirkungen der Nanomaterialien auf Eigenschaften der erzeugten Granulate zu bewerten und mögliche Einschränkungen der Recyclierbarkeit von Verpackungsmaterialien mit Nanomaterialien aufzuzeigen und Aufschluss über notwendige technologische Anpassungen der Recyclingverfahren zu geben.

Für PE und PP Folien konnte gezeigt werden, dass – abgesehen von geringfügigen Schwankungen bei bestimmten Eigenschaften (z.B. Gelbwert, Zugfestigkeit, Reißfestigkeit) – Nanomaterialien (PE mit Nanoclay bzw. PP mit Ag) im Recyclingstrom die mechanischen Eigenschaften und die Materialqualität den recycelten Kunststoffs nicht beeinflussen. Trotz Anreicherung des PE mit 20% Nanoclay bzw. mit 20% CaCO₃ gab es keine Einschränkungen der

Verarbeitbarkeit. Die Anwesenheit von Nanopartikeln führte auch zu keinem Abbau von PE. Die Nanostoffe verursachten jedoch in beiden Fällen Farbabweichungen im recycelten Material, was deren Anwendungsbereich einschränkt (z.B., wenn Transparenz gefordert ist). Für mit Ag angereichertes PP ergaben sich ähnliche Ergebnisse: die mechanischen Eigenschaften des Polymers veränderten sich nicht durch Anreicherung mit Nano-Ag, es traten jedoch sichtbare Farbabweichungen auf. Eine Zunahme der Vergilbung ließ auf einen Abbau des Materials schließen (d.h. eine Verringerung des Zugmoduls, der Zugfestigkeit, der Reißdehnung und der Reißfestigkeit).

In Hinblick auf PET fand man heraus, dass Zugabe von Nanomaterialien (ZnO, Ag und Nanoclay) zu Kunststoffproben im PET-Recycling Farbabweichungen verursacht, die z.B. zu verringerter Transparenz (z.B. bei Lebensmittelverpackungen) führen. Zugaben von Nanomaterialien (insbesondere Ag) in die recycelte PET-Matrix beeinflussten die Helligkeit, den Gelbwertindex und aufgrund eines leichten Polymerabbaus wichtige Eigenschaften des recycelten Materials (z.B. Rückgang der Reißfestigkeit und der Reißdehnung). Zugabe von Nanoclay führte dazu, dass Gerüche und Abbaudämpfe bei der Verarbeitung auftraten. Insgesamt wurde die Verarbeitbarkeit der Materialien dadurch aber nicht eingeschränkt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es bei den meisten von Sánchez et al. (2014) untersuchten Polymeren (PE, PP und PET) zu für das menschliche Auge wahrnehmbare Veränderungen der Farbe des Materials kam. Farbveränderungen stellen per se keine Verschlechterung des recycelten Kunststoffs dar. Inwiefern diese Eigenschaftsveränderung aber von den Anwendern akzeptiert wird, hängt von der jeweiligen Anwendung und dem Kunden ab.

Die befragten ExpertInnen aus den Recyclingbetrieben haben auch auf Verfärbung der Kunststofflocken und Granulate hingewiesen, die sie aber auf Verunreinigungen des Abfallstroms zurückführen (z.B. Polymerblends oder nicht aussortierte gefärbte Kunststoffteile).

Die ExpertInnen aus den Recyclingbetrieben konnten darüber hinaus bisher keine Auswirkungen von Nanomaterialien auf das Recyclingverfahren feststellen. Nachdem Nanomaterialien normalerweise nur in geringen Mengen eingesetzt werden, erwarten die ExpertInnen auch keine auffälligen Auswirkungen auf den Recyclingprozess selbst. Sollte die Qualität des Endprodukts durch die Anwesenheit von MNM negativ beeinflusst werden, müssten jedoch Maßnahmen ergriffen werden.

Nanobeschichtungen (etwa 0,2-0,5% des Kunststoffs) werden ins Recyclat eingearbeitet und dadurch im Material verteilt. Diese geringe Menge an Fremdanteil im Recyclat hätte für einen zweiten Lebenszyklus kaum Konsequenzen, womöglich aber bei häufigeren Recyclingprozessen.

Derzeit wird in Hinblick auf möglicherweise vorhandene Nanopartikel / Nanomaterialien von den befragten ExpertInnen keine Notwendigkeit gesehen, die Recyclingverfahren bzw. die Anlagen anzupassen.

5.5.3.1 Wirkung von MNM als „Störstoffe“ oder „Enabler“ im Recyclingprozess bzw. im Recyclat

Jeder Zusatzstoff im Kunststoff (z.B. Farben, Füllstoffe) ist prinzipiell ein mehr oder weniger großer Störfaktor für das Recycling, weil diese Stoffe in der Regel thermisch instabil sind. Sie werden schon beim ersten Schmelzprozess thermisch geschädigt, haben aber normalerweise noch keine besonderen Auswirkungen. Da sie beim zweiten Schmelzvorgang schon viel stärker geschädigt werden, verfärbt sich der Werkstoff aufgrund der thermischen Überlastung gelblich bis bräunlich, was in Hinblick auf die geplante Anwendung die Qualität verschlechtern kann.

Zwischen chemischen Substanzen – unabhängig davon ob nanoskalig oder nicht – kann es prinzipiell immer unerwartete Querreaktionen geben. So können auch Nanomaterialien je nach Material unterschiedliche Auswirkungen auf den Recyclingprozess bzw. das Endprodukt haben und den Recyclingprozess als Störstoff behindern oder als Hilfsstoff (Enabler) vereinfachen. Ob ein Zusatzstoff (z.B. ein Füllstoff) als Stör- oder Hilfsstoff wahrgenommen wird, hängt immer auch von der Anwendung des Endprodukts ab. Kunststoffprodukte müssen eine Vielzahl an Anforderungen erfüllen und enthalten dadurch eine Vielzahl an unterschiedlichen Komponenten. Je mehr Komponenten in einem Stoffstrom zusammengeführt werden, umso schwieriger kann das Recycling werden. Bei anwendungsspezifischen und sortenreinen Sortierungen und geschlossenen Kreisläufen (z.B. PET-Flaschen) sind Additivierungen weniger problematisch, weil Additivierungen immer anwendungsspezifisch eingesetzt werden.

Die ExpertInnen schätzen den **Einfluss von Nanomaterialien auf den Recyclingprozess** als eher gering ein. Nanomaterialien werden aufgrund ihrer speziellen Funktionalität nur in kleinen Mengen der Polymermatrix zugesetzt (mindestens Faktor 10 weniger) und verändern diese dadurch auch weniger. Je weniger Fremdmaterial in der Matrix, d.h. im schmelzbaren Kunststoffanteil, der beim Recycling weiterverarbeitet wird, ist, desto weniger werden die technischen Eigenschaften (z.B. Fließfähigkeit, Schmelzpunkt) der Matrix beeinflusst und desto besser kann sie wiederverarbeitet werden. Ein Experte mutmaßte, dass im Fall von Füllstoffen, nanoskalige Materialien sogar einen Vorteil gegenüber von konventionellen Materialien im Recyclingprozess haben könnten, weil sie die Verarbeitung weniger stören. Normale nanoskalige Barriere-Schichtsilikate würden sich jedenfalls nicht auf das Recyclingverfahren auswirken. Problematische Eigenschaften von Nanomaterialien würden sich schon beim Herstellungsprozesse zeigen (z.B. schnelle Abbaubarkeit des Materials) und nicht erst beim Recycling. Der Einsatz von katalytisch wirkenden Inhaltsstoffen wird daher schon während des Herstellprozess vermieden. Kommen verschiedene Nanofüllstoffe in einem Polymer

zusammen, wird es kaum größerer Reaktionen geben. Man kann hingegen nicht ausschließen, dass beispielsweise Nanofüllstoffe aus einem Recyclat mit dem Nanomaterial-Additiv eines anderen reagieren und dabei Gele bilden, die im Endprodukt zu Fehlstellen führen. Das wäre aber keine nanofüllstoffspezifische Eigenschaft, sondern würde mit herkömmlichen Materialein genauso passieren.

Würde beispielsweise der Anteil an PET-Flaschen bzw. Verpackungsfolien, die mit Nanopartikel modifiziert sind, im Recyclingstrom um ein Vielfaches ansteigen, könnten sich die Nanopartikel auch merkbar negativ auf den Prozess auswirken. Insgesamt ist es aber schwierig, allgemeine Aussagen in Hinblick auf das Reaktionsverhalten von Nanomaterialien zu treffen, weil es zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Komponenten in den Kunststoffrezepturen gibt. Obwohl die Wahrscheinlichkeit gering ist, kann man nicht ausschließen, dass es keine negativen Reaktionen zwischen den verschiedenen Komponenten geben kann. Der Einsatz von weniger Komponenten (Anzahl und Menge) und einheitlicheren Materialien bei der Kunststoffentwicklung wäre daher für das Recycling von Vorteil.

Nanoskalige Beschichtungen und Färbungen könnten auch die Detektion bei der Vorseparation in den Sortieranlagen stören. Separierung erfolgt oft mit Infrarotsortiermaschinen, die aufgrund ihres Infrarotspektrums automatisch die Mahlgüter aussortieren.

Zugaben von pulverförmigem, nanoskaligen Ruß bzw. von fluoreszierenden Nanopartikeln, die an Maschinen anhaften, könnten die Recyclinganlagen verunreinigen. Im Normalfall werden Nanomaterialien aber nur in gebundener bzw. suspendierter Form zugesetzt.

Nanomaterialien können auch die **Qualität der Endprodukte** (Recyclate) beeinflussen. Wie oben beschrieben, können sich Nanomaterialien beispielsweise negativ auf die Farbe, die Transparenz oder mechanische Eigenschaften des Recyclats auswirken (Sánchez et al. 2014). Können diese Eigenschaften während des Recyclingprozesses nicht korrigiert werden, müssen die Recyclate für qualitativ niederwertigere Produkte eingesetzt werden (Downcycling).

Äußere Einflüsse, wie Wärme, Licht und UV-Strahlung sowie wiederholtes Aufschmelzen und Festigen in Recyclingprozessen bedingen Alterungs- und Abbauprozessen. Um dem entgegenzuwirken und die Qualität der Recyclate sicher zu stellen, werden Kunststoffe normalerweise während des Recyclingprozesses „aufgearbeitet“ bzw. „aufstabilisiert“, d.h. es werden der Polymerschmelze Additive zugesetzt, um die Verarbeitbarkeit zu verbessern oder die Kettenlänge der Polymere zu verlängern. Bei geschlossenen Kreisläufen handelt es sich dabei um solche Additive, die schon bei der Produktion des Neukunststoffes dem Rohpolymer zugesetzt wurden. In diesem Verarbeitungsschritt können nanoskalige Zusatzstoffe die Stabilisierung von recycelten Kunststoffen verbessern. So kann beispielweise Polypropylen während des Recyclingverfahrens durch Zusatz von Nanofüllstoffen wie z.B. Nanoton,

Calciumcarbonat, Siliciumdioxid, Zinkoxid oder Carbon Black aufbereitet werden und die thermischen, mechanischen und rheologischen Eigenschaften des Endprodukts verbessert werden (Zdiri et al. 2018).

Wenn das Ausgangsabfallmaterial (z.B. bei PE-Folien und PP-Folien) zu stark gefärbt ist, wird es meist als schwarzes Recyclat (z.B. für schwarzen Folien) verarbeitet. Um die Farbqualität zu verbessern wird der Kunststoffschmelze ein Carbon-Black Masterbatch zugesetzt. Ähnliches gilt für weiße Produkte. Sollen strahlend weiße PP oder PE-Granulate hergestellt werden, muss auch bei einem gut sortierten Ausgangsmaterial der vergrauten Schmelze Titandioxid beigemischt werden. Nachdem solche Zusätze aber auch einen Kostenfaktor darstellen, werden sie nur zugesetzt, wenn es unumgänglich ist. Werden dabei Nanomaterialien zugesetzt, fungieren sie als Enabler, die die Qualität der Endprodukte soweit anheben, dass sie wieder für die geplanten Anwendungen eingesetzt werden können.

Ein weiterer Vorteil von Nanomaterialien ist, dass z.B. Nanofüllstoffe im Vergleich zu konventionellen Füllstoffen schon in viel geringeren Mengen ihre Funktionalität entfalten können. Das bedeutet, dass das Grundpolymer viel weniger Nebenprodukte enthält und dadurch besser verarbeitet werden kann. Geringere Mengen an Füllstoffen beeinflussen beispielsweise weniger die Fließfähigkeit, den Schmelzpunkt und anderes im Kunststoff.

Nachdem Sortenreinheit des Ausgangsabfallstroms eine wichtige Voraussetzung für Recycling ist, gibt es auch Überlegungen, nanoskalige Marker in Kunststoffe einzubringen, um den Sortiervorgang zu erleichtern. Bisher ist aber noch unklar, wie solch ein Erkennungsmerkmal für Sortieranlagen aussehen könnte und was die Konsequenzen wären, wenn das recycelte Material downgecycelt wird.

Insgesamt betrachten die ExpertInnen MNM im Abfallstrom aufgrund ihrer geringen Mengenanteile als einen eher geringen Störfaktor im Vergleich zu anderen, problematischeren Verunreinigungen der Abfallfraktionen (z.B. durch Fremdkunststoffe, Biokunststoffe, diverse Anhaftungen oder Farben). Da man die Auswirkungen von (nanoskaligen) Zusatzstoffen aber nicht verallgemeinern kann, müsste jeder eingesetzte nanoskalige Zusatzstoff dahingehend untersucht werden, wie er sich konkret während der verschiedenen Prozessschritte des Recyclings verhält.

5.5.3.2 Weitere Störstoffe im Kunststoffrecycling

Nach Einschätzung der ExpertInnen gibt es im Recyclingprozess von Kunststoffen viel gravierendere Störfaktoren als nanoskaligen Zusatzstoffen, die die Recyclingfähigkeit und damit die Kreislaufführung von Kunststoffen erschweren bzw. verhindern.

Verunreinigungen durch Fremdkunststoffe, Polymerblends: Die gängigen Sammel- und Sortiermethoden sammeln bzw. sortieren Kunststoffe nicht immer sortenrein, wodurch die Recyclingfähigkeit der Materialien herabgesetzt werden kann. Ein Großteil der gesammelten Materialien (z.B. Verpackungsfolien) werden aufgrund ihrer Heterogenität nicht werkstofflich, sondern thermisch verwertet.

Im Sortier- und im Recyclingprozess geht es im Wesentlichen darum, die benötigten Mengen möglichst sortenrein zu bekommen und die groben Verunreinigungen wegzubekommen, damit die Materialien wiederverwendet werden können.

- In Polypropylen-Abfallströmen wird v.a. Polystyrol als störend wahrgenommen, weil es sich aufgrund ähnlicher Dichte in Waschprozessen nicht zu 100% von Polypropylen abtrennen lässt. Zur Trennung ist daher eine Nachsortierung notwendig.
- Bei PET-Flaschen können Flocken aufgrund des Inputstroms teilweise opak sein. Diese vermindern die Transparenz bei der Anwendung für neue Flaschen.
- Aluminiumbedampften Kunststofffolien sind schwer recycelbare Materialien und müssen aussortiert aus den Abfallfraktionen werden.
- In Kunststofffolien können immer wieder interne Gleitmittel oder Gele auftreten, die zu Fehlstellen im Endprodukt führen.

Verunreinigung durch Farbstoffe: Kunden wollen meist Recyclate in bestimmten Farbtönen. Da das Ausgangsmaterial sehr vielfältig sein kann, wird beim Sortierer zum Teil nach den Farben sortiert und zusätzlich beim Recycler noch einmal nach Farben nachsortiert. Farbstoffe können im Recyclat einen Gelbstich und dadurch – je nach Verwendung – Qualitätsminderung beim Endprodukt verursachen. Um die Farben (bzw. verfärbten Kunststoffteilchen) wieder herauszuholen, müsste man die verfärbten Flocken nach der Zerkleinerung mechanisch herausholen oder chemisches Recycling anwenden, das aber mit hohen Kosten verbunden ist. Mögliche Verunreinigungen durch Farbstoffe:

- Gemischtfarbige Fraktionen bei PET-Flaschen führen zu Gelbstichigkeit und verringerter Transparenz
- Verunreinigung durch Carbon Black: schwarze Kunststoffteile können mittels Nahinfrarot-Spektroskopie beim Sortieren nicht detektiert werden, und müssen stofflich abgetrennt werden und in einem schwarzen Recyclat verarbeitet werden
- Verunreinigung durch Titandioxid: schon geringe Verunreinigungen können im Endprodukt optisch wahrgenommen werden

Verunreinigungen durch Anhaftungen: Makroskopische Anhaftungen von Schmutz oder anderen Verunreinigungen (z.B. Fette) an Folien und Flaschen können die beim Recycling die

Polymerisation stören. Zudem muss im Recycling immer sichergestellt werden können, dass diese Verunreinigungen nicht ins Endprodukt übergehen.

Verunreinigung durch Biokunststoffe: Biokunststoffe werden im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen derzeit noch in geringeren Mengen produziert, ihr Einsatz (z.B. für Verpackungsfolien) nimmt aber stetig zu (Bertling et al. 2018; Frischenschlager et al. 2018). Die meisten Biokunststoffe sind bei Sortenreinheit für das werkstoffliche Recycling geeignet. Aufgrund ihres derzeit noch geringen Aufkommens ist eine getrennte Sammlung bzw. Sortierung als eigene Fraktion aber noch nicht wirtschaftlich umsetzbar. Sie werden deshalb gemeinsam mit anderen Kunststoffsorten gesammelt. Werden Biokunststoffe im Abfallstrom nicht erkannt und aussortiert, können sie im Recyclingprozess der konventionellen Kunststoffe zu problematischen Störstoffen werden. Aufgrund ihres anderen Schmelz- und Druckverhaltens im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen, können sie während des Extrusionsprozesses zum Verkleben der Düsen führen, Filter verstopfen oder zu einem kontaminierten Endprodukt führen, das für die angestrebte Applikation nicht mehr eingesetzt werden kann.

5.5.4 Recyclierbarkeit von Kunststoffen mit MNM

Thermoplastische Kunststoffe können mehrmals recycelt werden. Die meisten eingesetzten Kunststoffe können 3-5 Lebenszyklen problemlos durchlaufen, bevor Viskosität und die mechanischen Eigenschaften des Materials negativ beeinflusst werden (Sánchez et al. 2014). Bei richtiger „Aufstabilisierung“, d.h. „d.h. Zugabe von Zusatzstoffen, können mehr Lebenszyklen erreicht werden. Beispielsweise sorgen Stabilisatoren dafür, dass das Material nicht in kürzester Zeit abgebaut wird, wenn sie UV-Strahlung ausgesetzt werden.

Durch wiederholtes Recycling kommt es zu Vergilbung des Materials, was auf werkstoffliche Belastungen durch wiederholtes Aufschmelzen und auf Verfärbungen durch Polymerblends oder Additive zurückzuführen ist. Verfärbungen und Aromen beeinträchtigen weder das Recyclingverfahren noch das Endprodukt, werden aber vom Kunden nicht gewünscht.

Daneben muss man durch wiederholtes Recycling auch mit Veränderungen der mechanischen Eigenschaften rechnen, die aber teilweise im Verfahren auch wieder kompensiert werden (z.B. während des Prozesses der lebensmitteltauglichen Aufbereitung von PET-Flaschen).

Darüber hinaus bemerken Recycler derzeit keine Auswirkungen durch wiederholtes Recycling. Es wird aber erwartet, dass sich mit Zunahme der Recyclatanteile im Abfallstrom die Zusammensetzung des Stoffstromes merkbar ändern wird. Mögliche Auswirkungen kann man derzeit noch nicht abschätzen.

In Hinblick auf MNM vermuten die ExpertInnen, dass es durch mehrere Recyclingzyklen kaum zu einer Anreicherung von Nanomaterialien im Kunststoff kommen wird. Einerseits sind die Mengen an Nanomaterialien in neuen Kunststoffen normalerweise gering, und andererseits würde sich eine „Zuviel“ an Nanomaterialien relativ schnell auf die Qualität des Recyclats (z.B. schlechtere Verarbeitbarkeit durch zu große Mengen an Schichtsilikat) auswirken. Ein Bericht des Umweltbundesamtes weist dagegen auf die Möglichkeit einer Anreicherung von Nanomaterialien im Recyclat hin (UBA 2018).

5.5.5 Rückführbarkeit von MNM

Das Zielobjekt für eine Rückführbarkeit von MNM kann auf 3 Ebenen liegen: (i) die Substanz (z.B. nano-Gold als Gold); (ii) die Nanopartikel als Nanopartikel; und (iii) die Polymermatrix, die durch Nanopartikel bestimmte Eigenschaften bekommen hat.

Derzeit ist es technisch und aus Kostengründen nicht möglich, Zusatzstoffe (d.h. Nanomaterialien/Nanopartikel genauso wie andere, konventionelle Füllstoffen) beim mechanischen Recycling als Substanz oder als Nanopartikel aus dem Ausgangsmaterial herauszuholen. Bei konventionellen Füllstoffen werden etwa 10-30% in die Kunststoffmatrix eingebracht, bei Nanofüllstoffen etwa 1-5%.

Beim chemischen Recycling könnte man zukünftig vielleicht eine Separation andenken. Das Ausmaß und die mögliche Reinheit wären vergleichbar mit jedem anderen chemischen Prozess. Es ist aber auch hier fraglich, ob dazu mehr Energie eingesetzt werden müsste als für die Herstellung neuer MNM.

Rückführbarkeit von MNM würde für Recycler erst dann zum Thema werden, wenn einerseits die Nanomaterialien selten und kostbar wären und es daher wirtschaftlich vertretbar wäre, oder wenn andererseits das Entfernen der MNM zu einer Qualitätsverbesserung des Endprodukts (z.B. in Hinblick auf Transparenzgrad des Granulats) oder des Produktionsprozesses führen würde. Trotz höherer Kosten von MNM im Vergleich zu konventionell verwendeten Zusatzstoffen im Kunststoff, sind die typischen Füll- und Beschichtungsstoffe (z.B. SiO_2) nicht sehr teuer und fallen auch nicht in großen Mengen an. Derzeit erscheint es daher nicht lohnenswert, die MNM aus dem Kunststoff herauszuholen, weil der technische und energetische Aufwand dafür zu groß wäre. Beispielsweise würde ein Experte es begrüßen, grundsätzlich weniger Titandioxid in den Kunststoffen zu verwenden als es mit kostenintensiven Bemühungen wieder heraus zu holen.

Für MNM, die in einer Kunststoffmatrix gebunden sind, wäre es daher in Hinblick auf mechanisches Recycling ökonomisch sinnvoller die Rückführbarkeit auf Ebene der Matrix anzustreben, als die Rückführbarkeit der Substanz bzw. der Partikel.

Indem man die Abfallstoffströme sortenrein hält (durch Sammlung und Sortierung), und geschlossene Kreisläufe anstrebt, werden die produktspezifischen (nanoskaligen) Zusätze in der Polymermatrix gehalten und die Recyclate produktspezifisch wieder auf dieselbe Anwendungsgruppe weitergegeben (z.B. Rezyklate aus PET-Flaschen werden wieder für PET-Flaschen eingesetzt). Dies würde eine Rückführung der Nanopartikel/Nanomaterialien, d.h. ein Herauslösen der MNM aus der Matrix unnötig machen, weil die im Kunststoff gebundenen MNM für die Qualität des Recyclats ohnehin notwendig wären (vorausgesetzt es handelt sich um in der EU erlaubte MNM). Befinden sich MNM im Kunststoff, die in der EU nicht zugelassen sind (z.B. aufgrund von Kunststoffverpackungen, die außerhalb der EU unter anderen gesetzlichen Rahmenbedingungen produziert worden sind), werden diese in einem geschlossenen Kreislauf durch die Recyclate in nachfolgende Anwendungen verschleppt.

Bei PET-Getränkeflaschen ist derzeit eine geschlossene Kreislaufführung (weitgehend) möglich. Sofern nur in der EU zugelassene MNM in den PET-Flaschen enthalten sind, ist es aus verfahrenstechnischen Gründen nicht notwendig, diese während des Recyclingprozesses aus den Kunststoffen herauszuholen. Gefährliche oder unerlaubt zugesetzte MNM (z.B. bei Flaschen, die außerhalb der EU produziert worden sind) würden bei einem geschlossenen Kreislauf jedoch ebenfalls in den Recyclaten bestehen bleiben. Um entscheiden zu können, wie mit solchen MNM umgegangen werden soll, müsste zuerst analytisch nachgewiesen werden, welche MNM und in welchem Ausmaß in den PET-Flaschen enthalten sind und welche konkreten Auswirkungen sie auf die nachfolgenden Anwendungen haben. Die Wirkung von Restnanomaterialien auf Produkte, die recycelte Materialien enthalten, ist im Allgemeinen schwer abzuschätzen (Andersen et al. 2014).

Recyclate aus lebensmitteltauglichen Kunststoffverpackungsfolien können derzeit nicht wieder für Lebensmittelkontaktmaterialien eingesetzt werden und werden daher downgecycelt. Produktspezifische MNM (v.a. Beschichtungen) der Folien verbleiben homogen in den Recyclaten und gehen dadurch auf neue Anwendungen über. Auch hier wäre auf analytischem Wege zu überprüfen, welche konkreten Auswirkungen sie auf die nachfolgenden Anwendungen haben. Laut Aussage der ExpertInnen können Polyolefine wie PE Verunreinigungen (z.B. in Form von Zusatzstoffen) von 1-2% normalerweise ohne merkbare Auswirkung auf die Produktqualität des Kunststoffs problemlos tolerieren.

Reijnders (2014) schlägt für ein sicheres Recycling von Nanomaterialien in Polymeren ein sogenanntes „resource cascading“ („Ressourcenkaskadierung“) vor, das auf die maximale Nutzung von Qualität und Nutzungsdauer der Ressourcen abzielt (Tabelle 3). Im Rahmen dieses Modells befinden sich das Recycling von PET-Flaschen auf Ebene der Schritte 2/3 und das Recycling von Kunststoffverpackungen auf Ebene der Schritte 2/3 für nicht-lebensmitteltaugliche Verpackungsfolien und auf Ebene des Schritts 4 für lebensmitteltaugliche Verpackungsfolien.

Tabelle 3: Schritte in einer generalisierten Ressourcenkaskade für Nanokompositen aus Nanopartikeln und Polymeren (Reijnders 2014)

Schritt	Beschreibung
Schritt 1	Erweiterung der Produktnutzung und Produktwiederverwendung
Schritt 2/3	Wiederaufbereitung und Wiederverwendung von Nanokompositmaterialien zur Verwendung in Produkten mit ähnlichen Spezifikationen wie das Originalprodukt (Recycling)
Schritt 4	Wiederverwendung von Nanokompositmaterialien in Produkten mit geringeren Leistungsanforderungen (Downcycling)
Schritt 5	Gegebenenfalls Depolymerisation oder Devulkanisation, gefolgt von einer Wiederverwendung in organischen Polymeren und Rückgewinnung/Wiederverwendung von Nanopartikeln
Schritt 6	Pyrolyse, Cracking oder gegebenenfalls teilweise Rückgewinnung von Materialien
Schritt 7	Verbrennung mit Energierückgewinnung

5.5.6 Exposition während Recyclingprozess und Auswirkungen von MNM auf den ArbeitnehmerInnenschutz

Wie im nachfolgenden Kapitel 6 ausführlich beschrieben wird, können Nanomaterialien theoretisch bei vielen Prozessschritten während des Recycling freigesetzt werden (vergl. Kapitel 5.3 und 5.4). Inwiefern und in welchen Mengen Nanomaterialien tatsächlich z.B. als Stäube durch Abrieb (während des Transports, bei der Reinigung, oder anderen mechanischen Prozessen) freigesetzt werden, ist weitgehend unbekannt (Part et al. 2015b) und müsste durch Messungen überprüft werden. Die ExpertInnen können darüber nur Vermutungen anstellen.

Es ist davon auszugehen, dass Nanopartikel bei der Verarbeitung immer agglomerieren. Beim werkstofflichen Recycling werden Kunststoffe aufgeschmolzen und weiterverarbeitet. Nanomaterialien, die z.B. als Additive ursprünglich in die Polymermatrix eingearbeitet wurden, sind mit dem Material chemisch verbunden und sollten nicht freigesetzt werden können. Werden Additive während des Recyclings der Polymerschmelze zugemischt, geschieht das in Form von Masterbatches, in denen die Partikel ebenfalls gebunden sind. Für die herkömmliche Thermoplastenverarbeitung werden keine Probleme erwartet, auch nicht bei einer Vermahlung, weil die Zerkleinerung durch die Mahlaggregate gröbere Partikel als jene der Nanofüllstoffe herstellt. Eine sehr kleine Zerkleinerung durch Mahlaggregate würde nach Aussage eines Experten noch immer in Partikel im Millimeter-Bereich resultieren und Feinstaub im Bereich von Mikrometern liegen.

Raynor et al. (2012) konnten jedoch (bei nicht gealterten) zeigen, dass bei der Zerkleinerung von Nanoton-Polypropylen-Nanokomposition und reinem Polypropylen Nanopartikel freigesetzt werden, die Freisetzung von Nanopartikel beim Nanokomposit aber niedriger ist als beim reinen Polypropylen. Nachdem bei Alterung der Kunststoffe Photooxidation einsetzen kann, ist zu überprüfen, inwieweit das Auswirkungen auf die Freisetzung von Nanopartikel haben kann.

Manche Nanomaterialien, wie z.B. Schichtsilikate (z.B. Montmorillonite) sind laut Erfahrungen eines Experten im Vergleich zu anderen chemischen Stoffen deutlich einfacher zu handhaben. Schichtsilikate können als Pulver in die Matrix eingebracht werden. Sie liegen als gestapelte Plättchen vor, zwischen die im Extruder die Polymerketten der Kunststoffe eindringen und sie dadurch sprengen. Erst in diesem exfolierten Zustand nehmen die Silikate Abmessungen in Nanogröße an. Liegen die Partikel in der Matrix vor, sind sie wie jeder andere Füllstoff zu verarbeiten. Ein Experte aus den Recyclingbetrieben meinte jedoch, dass Montmorillonit-Tone aufgrund ihres Preises eher selten als Füllstoffe in Kunststoffen eingesetzt werden. Talkum (Calciumcarbonat) wird mengenmäßig am häufigsten eingesetzt.

Derzeit gibt es nur wenig Information inwieweit Nanomaterialien während der Abfallaufbereitung freigesetzt werden und ArbeitnehmerInnen exponiert sind. Es fehlen konkrete Messwerte zu Inhalationsbelastungen und Hautkontaminationen.²⁷

Recyclingbetriebe sind immer auf einen bestimmten Anwendungszweck ausgelegt. Um sie in Betrieb nehmen zu können, bedarf es einer Betriebsanlagengenehmigung, die erst erteilt wird, wenn alle behördlich auferlegten Anforderungen erfüllt sind (z.B. Gewerberecht, Wasserrecht). Recyclingbetriebe erfüllen die für eine Betriebsgenehmigung notwendigen Auflagen sowie die für den ArbeitnehmerInnenschutz gesetzlich vorgegebenen Schutzmaßnahmen (z.B. Absaugeinrichtungen, Filteranlagen, Verarbeitung der Materialien in weitgehend geschlossenen Behältern, Abwasseraufbereitungsanlagen, Beachtung der Sicherheitsdatenblätter). Nachdem nicht bekannt ist, ob und welche MNM im Recyclingprozess vorkommen, werden darüber hinaus keine speziell auf MNM ausgerichteten Vorkehrungen getroffen.

Es wird davon ausgegangen, dass mit der Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben, das Expositionspotenzial abgedeckt wird und die modernen Verfahren zur Abfall- und Abwasserbehandlung einen Großteil der enthaltenen Nanomaterialien zurückhalten würden. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass Nanomaterialien auch in die Umwelt gelangen könnten.²⁸ Es wird als Aufgabe des Gesetzgebers gesehen zu entscheiden, ob die

²⁷ <https://nanoinformation.at/bereiche/umwelt/entsorgung.html?L=0> [Zuletzt abgefragt am 16.10.2019]

²⁸ <https://nanoinformation.at/bereiche/umwelt/entsorgung.html?L=0> [Zuletzt abgefragt am 16.10.2019]

ArbeitnehmerInnenschutz-Vorgaben im Umgang mit Nanomaterialien ausreichend sind oder strengere Tests eingeführt werden sollten.

In der Forschung sind es Kunststoff- und Recyclingexperten gewohnt mit verschiedenen, z.T. auch gefährlichen, chemischen Substanzen im Labor zu hantieren. Es gehört zur guten Laborpraxis, sich über potenzielle Gefahren, die von den chemischen Substanzen ausgehen im Vorfeld zu informieren, notwendige Sicherheitsaspekte zu beachten und Sicherheitsvorkehrungen umzusetzen. Das gilt für alle chemischen Substanzen, unabhängig davon, ob es sich dabei um Nanoformen handelt oder nicht. Beim Compoundieren, d.h. wenn Zusatzstoffen/Zuschlagstoffen (Füllstoffe, Additive, etc.) zu den Kunststoffen gemischt werden, um erwünschte Eigenschaften zu erzielen, werden speziell die notwendigen Sicherheits- und Absaugestandards beachtet. Das Einmischen erfolgt hauptsächlich in Spezialmischern und Knetern. Laut ExpertInnen sind Projektpartner (Kunden) bei der Produktentwicklung erfahrungsgemäß sehr vorsichtig und vorausschauend, was die Arbeitssicherheit betrifft, und besonders, wenn Materialien (wie z.B. Füllstoffe, Additive) eingesetzt werden, mit denen sie wenig Erfahrung haben.

Bei Forschungsprojekten gibt es im Normalfall keine Sicherheitsauflagen von den Förderstellen, die über das normale Maß hinausgehen. In jedem Fall muss aber auf die Arbeitsschutzvorgaben geachtet werden, um MitarbeiterInnen nicht zu gefährden. Diese Vorgaben betreffen aber alle Arbeitgeber.

Werden Nanopartikel bzw. die Nanomaterialien in Projekten eingesetzt, ist man sich des Gefahrenpotenzials bewusst. Das Gefahrenpotenzial wird für unterschiedliche Nanomaterialien unterschiedlich eingeschätzt: z.B. höheres Gefahrenpotenzial bei den Kohlenstoff-Nanofasern und den Kohlenstoffnanoröhren, geringeres Gefahrenpotenzial bei den größeren, weniger mobilen Nanoclay-Sichtsilikaten.

Im Unterschied zur Handhabung von anderen potenziell gefährlichen chemischen Substanzen werden beim Einsatz von Nanopartikel Absauge-Anlagen mit verbesserten oder weiter entwickelten Filterklassen eingesetzt. Die konkrete Vorgehensweise und Anlagen hängen aber auch vom jeweiligen Bereich der Kunststoffverarbeitung ab. So wird beispielsweise bei der Komposit-Verarbeitung viel Carbonmaterial verarbeitet, dessen Stäube sehr fein sein können. Bei der konventionellen Kunststoffverarbeitung, bei der vorhandenes Nanomaterial schon in der Matrix gebunden ist, reichen herkömmlichen Sicherheitsvorkehrungen aus. Bei den Sicherheitsmaßnahmen ist auch immer zu beachten, ob die verwendete Nanoform als Straub oder in flüssiger Form vorliegt.

Beim Upscaling von Verfahrensprozessen vom Labormaßstab zum Großmaßstab einer Betriebsanlage sind andere Gefahrenpotenziale zu beachten, die von den Sicherheitsfachleuten

der Produktionsstätte bzw. Recyclinganlage bewertet werden müssen. Beim werkstofflichen Recycling von Kunststoffen gelten die gleichen Verarbeitungsgrundprinzipien wie bei der Herstellung von Neuware (z.B. Schmelzverarbeitung).

5.6 Verbesserungsmöglichkeiten für den Recyclingprozess von MNM

Derzeit sehen die ExpertInnen keine unmittelbare Notwendigkeit, den Recyclingprozess in Hinblick auf etwaige Nanomaterialien im Abfallstrom prozess- oder verfahrenstechnisch spezifisch anzupassen.

Um Recyclingquoten weiterhin einhalten bzw. verbessern zu können, ist es wichtig, dass die Werkstoffe recycelbar bleiben, zu wissen, wie sich Zusatzstoffe (z.B. Nanofüllstoffe) im System bei mehrfacher Verarbeitung auswirken, ob sichergestellt werden kann, ob das Nanomaterial gebunden bleibt und ob die Kunststoffmatrix nicht zu stark abbaut. Gerade im Bereich der Verpackung (nicht nur im Bereich der Kunststoffe) wird die Frage nach der Recyclingfähigkeit grundsätzlich an Bedeutung gewinnen.

Die ExpertInnen nannten folgende Bereiche, in denen Anpassungen vorgenommen werden sollten, um die Recyclingfähigkeit von Kunststoffen zu erhöhen. Obwohl diese Maßnahmen vordergründig auf den gesamten Recyclingprozess von Kunststoffen abzielen, können sie indirekt auch Auswirkungen auf das Recycling von nanomaterialhaltigen Kunststoffen haben:

Erhöhung der Sortenreinheit und Produktspezifität in den Abfallströmen: Sortenreinheit trägt dazu bei, dass spezifische Abfallströme wieder produktspezifisch aufbereitet und in geschlossenen Kreisläufen geführt werden können (vergl. PET-Flaschen). Befinden sich Nanomaterialien im Stoffkreislauf, kann weitestgehend sichergestellt werden, dass sie auch wieder produktspezifisch eingesetzt werden.

Sortenreinheit in den Abfallströmen kann durch **innovative Änderungen bei den Sammelsystemen** erhöht werden, in dem gezielt spezifische Abfallkomponenten gesammelt werden. Ein Beispiel für eine Umsetzung wäre z.B. ein Pfandsystem für Kunststoffe (nach deutschem Vorbild). Dieser Ansatz kann zu sehr sauberen Stofffraktionen führen (z.B. PET-Getränkeflaschen vs. Nicht-Getränkeflaschen). Verbesserungen in den Sammelsystemen zur Erhöhung der Sortenreinheit verursachen aber oft höhere Kosten. Ohne gesetzliche Vorgaben wird jedes Sammelsystem aus Kostengründen nur so viel sammeln und in der Qualität, wie es muss, weil jede Übererfüllung der Vorgaben Geld kostet.

In Deutschland wurde das Pfandsystem vom Handel aufgebaut und basierend auf einer großen Nachfrage nach den Werkstoffen optimiert. Da sich unsortierte Gebinde aber genauso gut

verkaufen lassen wie sortierte, konnte sich das Potenzial für Sortenreinheit nicht immer realisieren lassen. Ein Experte berichtete von Erfahrungen mit Supermarktfilialen, die das Pfandgut in manchen Fällen gemischt (z.B. verschiedene Farben, verschiedene Materialien) in großen Polyethylensäcken gesammelt, ins Zentrallager verfrachtet und dort zu Ballen gepresst haben. Solche Fraktionen können verschiedenfarbige PET-Flaschen, zerrissene Aluminiumdosen und zerrissene Polyethylen-Säcke enthalten, was große Nachteile für das Recycling bringt. Pfandsystem für Getränkeflaschen decken jedoch nur einen Bruchteil der gesamt anfallenden Kunststoffe ab.

Zusätzlich sollte auch die **Sortierung verbessert** werden. Derzeit werden Kunststoffabfälle sowohl bei den Sortierern als auch bei den Recyclern sortiert, weil sie nach unterschiedlichen Kriterien in Hinblick auf den Reinheitsgrad sortieren. In Hinblick auf eine Prozessoptimierung könnte die Sortierung soweit ausgebaut werden, dass Sortierung nur mehr in einer Branche stattfindet. Entwicklungen in der Sortiertechnologie können ebenfalls die Sortenreinheit von Abfallfraktionen verbessern. Voraussetzung dafür wäre auch eine intensivere Zusammenarbeit zwischen den Sortierern und Recyclern, um das Potenzial auszuschöpfen.

Reduktion der Diversität an Kunststoffen mit unterschiedlichen Inhaltsstoffen schon beim Design der Kunststoffe (weniger verschiedene Kunststoffe): Mangelnde Sortenreinheit ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass es eine große Vielfalt an Kunststoffen gibt, die mit unterschiedlichen Inhaltsstoffen versehen sind und unterschiedlich miteinander kombiniert werden können (z.B. als Polymerblends, Mehrschichtfolien, etc.). Individuell angepasste Werkstoffe optimieren zwar den Werkstoffeinsatz und die Anwendung, verringern aber die Recyclingfähigkeit nach der Anwendung.

Die ExpertInnen empfehlen deshalb, dass schon beim Design von Kunststoffverpackungen darauf geachtet werden soll, welche Komponenten in den Kunststoff gemischt werden und wie das Produkt recycelt werden kann. Die Circular Packaging Design Guideline (FH Campus Wien 2019) empfiehlt, dass für ein recyclinggerechtes Design für Kunststoffverpackungen auf nur einige wenige, häufig eingesetzte Werkstoffe zurückgegriffen werden sollte. Es sollten nur Monomaterialien oder zumindest für das Recycling kompatible Materialkombinationen verwendet werden. Die Materialien sollten möglichst weitverbreitet sein (z.B. Polyolefine, PET), damit sie auch eine effektive Sammlung, Sortierung und das Recycling von Kunststoffverpackungen umgesetzt werden kann. Die Guideline empfiehlt auch nur das Notwendigste an Zusatzstoffen (Additiven) im Material einzusetzen. Sie weist drauf hin, dass der Zusatz von Nanopartikel die Recyclingfähigkeit von PET-Getränkeflaschen verschlechtert.

Von Seiten der Wissenschaft gibt es viele Möglichkeiten, diese Designansätze bei der Entwicklung von Kunststoffen zu berücksichtigen. Solange es aber vom Gesetzgeber keine spezifischen Vorgaben gibt (z.B., dass nur Monomaterialien und keine Mehrschichtfolien

eingesetzt werden dürfen), besteht keine grundsätzliche Notwendigkeit, den Design-Vorschlägen zu folgen.

Kennzeichnung der Kunststoffe in Hinblick auf Inhaltsstoffe: In Hinblick auf Sortierung und Recycling von Kunststoffen wäre es wichtig zu wissen, was in den Abfallströmen konkret enthalten ist. Eine Kennzeichnung, die über jene der einzelnen Kunststoffsorten hinausgeht, und auch auf die Inhaltsstoffe abzielt, könnte dabei helfen. Nachdem Verpackungsfolien (v.a. aus dem post-consumer Bereich) meist in kleinen Stücken in den Abfallstrom gelangen, wäre es wichtig eine Methode zu finden, die es auch erlaubt, diese Kleinteile zuordnen zu können.

Zur Kennzeichnung von Nanomaterialien in Kunststoffverpackungen könnten Marker eingesetzt werden. Part et al. (2015b) beschreiben verschiedene Ansätze von Nanotraccern, die eingesetzt werden können, um synthetisch hergestellte von natürlich vorkommenden Nanopartikeln unterscheiden zu können. Diese MNM-Fingerprints zeichnen sich durch einzigartige optische Eigenschaften aus, oder können elementare oder Isotopen-Fingerabdrücke sein. Sie könnten beispielsweise auf der Häufigkeit von Seltenen Erden oder Isotopen oder DNA-Barcodes basieren. Experimentell wurden Rückverfolgbarkeit von Nanomaterialien auch schon mittels radioaktiv markierten einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhren oder fluoreszierenden, halbleitenden Quantenpunkten untersucht.

Alternativ könnten auch Strichcodes oder RFIDs auf jedem Kunststoffprodukt eingeführt werden. Solche Tags könnten aber möglicherweise unzureichend sein, weil sie während der Produktlebenszeit möglicherweise unbeabsichtigt entfernt oder nur schwer mit Standard-Tag-Lesetechnologien gelesen werden können.

In Anlehnung an den Stahl- und Aluminiumbereich könnten Normen verwendet werden, die eine bestimmte Kunststoffrezeptur mit bestimmten Inhaltsstoffen mit konkreter Nummer und Patenteigenschaft charakterisiert.

Marker könnten auch auf Basis von nanoskaligen Materialien entwickelt werden, die in der Matrix verteilt oder als Schichten aufgebracht werden und über Detektionsgeräte während des gesamten Lebenszyklus des Produkts erkannt werden können (Fitch et al 2014). Ihre geringe Größe macht sie für den Betrachter unsichtbar. Sobald Produkte mit Nano-Tags in den Abfallstrom gelangen, können sie identifiziert und abgetrennt werden, und gegebenenfalls zu den Herstellern gesendet werden, um dort verwertet zu werden. Es bleibt aber offen, was mit solchen (nanoskaligen) Markern im Downcyclingbereich passiert, wenn sie durch Recyclingprozesse verdünnt für andere Anwendungen eingesetzt werden, oder wenn mehrere Marker in einem Produkt eingesetzt werden. Es besteht die Gefahr, dass ein Marker durch wiederholtes Recycling nicht mehr einer bestimmten Anwendung (z.B. lebensmittelechte Verpackungsfolie) zugeordnet werden kann.

Zukünftig denkbar wäre auch, dass mittels Blockchain-Technologie jederzeit nachvollzogen werden könnte, was ein Hersteller in sein Produkt hineingegeben hat. Diese Technologie würde auch auf Produkte mit Nanomaterialien anwendbar sein, die aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften nur in geringen Anteilen im Produkt enthalten sind.

Idealerweise würden solche Marker über ein automatisches Erkennungssystem während der Sortierung ausgelesen werden können.

Erhöhung der Rückführbarkeit der Additive / Nanomaterialien: Derzeit können Zusatzstoffe, wie z.B. Nanomaterialien, beim mechanischen Recycling nicht aus dem Kunststoff herausgeholt werden. Forschungsaktivitäten sollten sich daher verstärkt darauf konzentrieren, wie Recyclingverfahren und -technologien angepasst werden können, damit solche Zusatzstoffe (inkl. Nanomaterialien) mit industriellen Verfahren wieder aus den Polymerschmelze herausgeholt werden können (Sánchez et al. 2014).

Darüber hinaus sehen die befragten ExpertInnen keinen Bedarf, das Recycling um weitere Aspekte, die über verfahrenstechnische Fragen hinausgehen (z.B. wirtschaftliche, ökologische, gesundheitliche Aspekte) zu ergänzen.

5.7 Ausblick

Nanomaterialien: Für die Zukunft erwarten die interviewten ExpertInnen verschiedene Weiterentwicklungen und Herausforderungen im Bereich Nanomaterialien und Kunststoffrecycling. Obwohl sich der Hype um Nanomaterialien/Nanopartikel, den es vor ca. 15 Jahren gegeben hat, mittlerweile gelegt hat, werden Nanomaterialien und Nanopartikel im Sinne der Funktionalisierung von Kunststoffen und der Funktionsintegration von Kunststoffen weiterhin ein Thema bleiben. Wenn es gelingt, Nanomaterialien so einzusetzen, dass ihre spezifischen Eigenschaften zu wesentlichen Verbesserungen in den Produktanwendungen führen, werden sie auch verbreitet eingesetzt werden.

Nachdem beispielsweise Nanofüllstoffe wesentlich teurer sind als die Kunststoffmatrix, wird das Ausmaß des Einsatzes von Nanomaterialien in Kunststoffen immer auch von wirtschaftlichen Überlegungen begleitet werden. Tragen die Nanomaterialien in Kunststoffen dazu bei, dass man Grundmaterial einsparen kann oder andere wesentlich bessere Eigenschaften erzielt, wird man sie weiterhin in Kunststoffen einsetzen, vermutlich aber nur in sehr spezifischen Anwendungen.

In Hinblick auf das Recycling besteht der Vorteil von Nanomaterialien / Partikel darin, dass man weniger Anteil an festen Komponenten (Füllstoffen) im Strom hat, als Nachteil könnten sich jedoch unerwartete Querreaktionen erweisen.

Kunststoffrecycling: Derzeit ist die Nachfrage nach Recyclaten (v.a. lebensmitteltaugliches PET) schon sehr hoch. Es wird damit gerechnet, dass der Bedarf noch weiter ansteigen wird. Aufgrund der angepeilten Ziele der Europäischen Kunststoffstrategie²⁹ und der Richtlinie (EU) 2019/904 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt³⁰ müssen PET Flaschen ab 2025 einen Mindestanteil von 25% und ab 2030 von mindestens 30% Recyclingmaterial haben. Zusätzlich muss die Sammelquote für Getränke-Flaschen bis 2025 77% nach Gewicht der auf den Markt gebrachten Produkte betragen und bis spätestens 2029 90% betragen. Die Unternehmen bereiten sich auf diese Ziele schon vor und entwickeln Strategien, wie sie Schritt für Schritt den Kreislauf schließen können.

Damit effiziente Werkstoffkreisläufe entstehen und weiterentwickelt werden können, braucht es aber strukturelle Voraussetzungen:

- Möglichst klare Definitionen der Werkstoffe, die eingesetzt werden sollen (z.B. möglichst keine fixen Verbunde als Verpackungskunststoff)
- Klare Unterscheidungsmerkmale für Kunststoffsorten und Inhaltstoffe (Marker), damit unterschiedliche Polymere leichter sortiert und sortenrein in das Recycling geführt werden können, um hochwertige Recyclate zu produzieren

Sortierung: In Zukunft soll die Sortierung (v.a. bei den Recycler) noch stärker verbessert werden, weil die Qualität des Endprodukts (Recyclat) stark von der Qualität des Ausgangsmaterials abhängt. Aufgrund der zunehmenden Anteile von bereits recycelten Kunststoffprodukten im Ausgangsmaterial, wird mit einer Abnahme der Qualität im Ausgangsmaterial gerechnet und dadurch ein größerer Aufwand in der Sortierung notwendig werden.

Abtrennung von Störstoffen: Im mechanischen Recycling wird ein verstärktes Augenmerk auf die Abtrennung von Störstoffen gelegt werden. Zum einen möchte man Waschvorgänge verbessern, um äußerlich anhaftende Verunreinigungen, z.B. Lebensmittelreste in Verpackungen, zu entfernen. Zum anderen wird man die Technologie verbessern, um Stoffe, die man durch Wäsche nicht wegbringen kann, sinnvoll aus dem Schmelzprozess abzutrennen.

²⁹ https://ec.europa.eu/environment/waste/plastic_waste.htm [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

³⁰ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32019L0904> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Verbesserung der Qualität der Produkte, z.B. Gerüche: Recyclingmaterial von verschiedenen Kunststoffen hat aufgrund der niedrigen Verarbeitungstemperatur haben noch einen Geruch. Zukünftig werden sich Methoden, um solche Gerüche zu eliminieren, noch weiterentwickeln. Derzeit gibt es dafür verschiedene Ansatzpunkte z.B. in Hinblick auf Additive oder neue Maschinenteknik (Vorsortierung, Waschung, etc.)

Forschungsbedarf wird von den ExpertInnen in folgenden Bereichen gesehen:

- Weiterentwicklung der Technologie für Sortiermöglichkeiten (Anlagenbauer sind gefordert)
- Abtrennvorbereitungstechnik für Störstoffe
- Reinigungstechnik (Gerüche, Gele, Vernetzungsreaktionen im Kunststoff)
- Aufbereitungstechnik, um möglichst hochwertige Recyclate zu bekommen
- Wissen darüber, was konkret mit Nanopartikel im Recyclingprozess passiert
- Wissen darüber, was mit den Biokunststoffen passiert, die in den Prozess eingeführt werden
- Weiterentwicklung von bereits bestehenden und neuen Applikationen für Recyclate

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass es den ExpertInnen wichtig war zu betonen, dass Kunststoffe – trotz der derzeit v.a. negativ gefärbten Diskussionen zu Plastikmüll, Mikroplastik, Umweltverschmutzung im Meer, etc. – wertneutral gesehen werden sollten. Es wird betont, dass Kunststoffe wertvolle Werkstoffe sind, die für unsere Gesellschaft wichtige Aufgaben erfüllen, v.a. in Bereichen Verpackung (z.B. für Lebensmittel), Transport und Infrastruktur (z.B. Rohre). Es sollte darauf geachtet werden, dass Diskussionen zu Nanomaterialien in Kunststoffen das vielfach negativ geprägte Bild von Kunststoffen nicht noch weiter verstärken.

6 Exposition von MNM in einer Kreislaufwirtschaft

6.1 Allgemeine Informationen über mögliche Risiken von MNM in der Kreislaufwirtschaft für Mensch und Umwelt

6.1.1 Allgemeine Risiken von MNM für die Umwelt

Einen Überblick über den Wissensstand darüber, inwieweit Nanomaterialien gesundheits- oder umweltschädigend sein können, bietet das österreichische Informationsportal nanoinformation.at. Demnach gibt es zum aktuellen Zeitpunkt keine eindeutigen Indizien, dass von Nanomaterialien eine signifikante Gefahr für die Umwelt ausgeht. Es gibt jedoch noch beträchtliche Wissenslücken. Es ist bis dato kaum möglich, eindeutige Aussagen darüber zu machen, ob durch die Herstellung, Verwendung und Entsorgung bzw. Verwertung von Nanomaterialien Umweltschäden zu befürchten sind. Insbesondere über langfristige Umwelteffekte ist wenig bekannt.³¹

Eine Aufnahme von Nanomaterialien in den menschlichen Körper kann prinzipiell über die Lunge, den Magen-Darm-Trakt, die Haut, die Geruchsnerve und über den Blutkreislauf erfolgen. Was die menschliche Gesundheit betrifft, werden in Bezug auf bestimmte Nanomaterialien vor allem negative Auswirkungen auf die Atemorgane sowie entzündungsfördernde, zellschädigende und karzinogene Wirkungen diskutiert. Man kann aber keine allgemeingültige Aussage zur Gefährlichkeit oder Sicherheit von Nanomaterialien treffen. Denn für den Großteil der Nanomaterialien liegen bis dato nur wenige toxikologische Daten vor. Insbesondere zu Langzeitwirkungen fehlen noch aussagekräftige Daten. Es lassen sich auch keine allgemeinen Aussagen über die Gesundheitsauswirkungen von Nanomaterialien an sich treffen, weil die verschiedenen Materialien und ihre diversen Nanoformen (wie z.B. Nano-Silber, Nano-Titandioxid) sehr unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen können. Außerdem ist fraglich, inwieweit die Ergebnisse von Experimenten mit Zellen auf Menschen übertragen werden können und inwieweit Testmethoden für herkömmliche Materialien auch bei Nanomaterialien valide sind.

Eine Aufnahme in den menschlichen Körper ist bei gebundenen Nanomaterialien, die im Produkt oder in der Anwendung fest verankert sind, eher unwahrscheinlich. Von inhalierten, in physiologischen Medien (Körperflüssigkeiten) unlöslichen Nanopartikeln geht eine Gefahr aus,

³¹ <https://nanoinformation.at/bereiche/umwelt/moegliches-umweltrisiko.html?L=0> – abgefragt am 3.9.2019

da sie in der Lunge – einmal abgeschieden – zu Entzündungen der Lunge und bei chronischer Belastung zu Krebs führen können. Dieses Phänomen ist nicht auf Nanopartikel beschränkt und kennt man unter anderem als Staublunge in der Medizin. Kritisch ist hier besonders, dass bereits kleine Mengen an Nanomaterial einer hohen Anzahl an Partikeln entsprechen und die Abwehr und die Reinigungsmechanismen des Körpers damit schneller überfordert sind als bei der gleichen Menge größerer Partikel. Besitzen die Partikel die Form von Nadeln oder steifen Fasern, wird die Selbstreinigung der Lunge zusätzlich noch erschwert und steigt damit das Krebsrisiko. Die höhere Toxizität aufgrund von Nadelform oder bei steifen Fasern kennt man auch von Asbest. Nanopartikel können darüber hinaus aufgrund ihrer Größe unter Umständen noch auch noch tiefer in den Atemtrakt vordringen als größere Partikel.

Von in physiologischen Medien *löslichen* Nanopartikeln kann dann eine Gefahr ausgehen, wenn die gelöste Form des Nanomaterials – wie z.B. dessen Ionen – toxisch ist. Von der Inhalation von Nanomaterialien gehen damit unter anderem Gefahren aus, die man auch von herkömmlichen Stäuben kennt, die aber von Fall zu Fall kritischer sein können.

Das tatsächliche Risiko, das von MNM – wie generell von chemischen Substanzen – für Mensch und Umwelt ausgeht, ergibt sich jedoch nicht nur aus der Toxizität der Substanz (also ihrer Gefährlichkeit), sondern auch aus der Exposition (also daraus, wie stark Mensch und Umwelt mit der Substanz überhaupt in Kontakt kommen). So kann etwa das Risiko einer hochtoxischen Substanz gering sein, wenn Mensch und Umwelt nur in geringen Mengen oder gar nicht in Berührung damit kommen – so wie umgekehrt das Risiko, das von einer nur gering toxischen Substanz ausgeht, beträchtlich sein kann, wenn Mensch und Umwelt der Substanz in hohem Ausmaß ausgesetzt sind. Dies gilt es bei Überlegungen zum Risiko von MNM im Zuge einer Kreislaufführung von Produkten stets zu berücksichtigen.³²

6.1.2 Exposition gegenüber MNM in der Abfall- und Recyclingwirtschaft

Der aktuelle Wissensstand zur Exposition gegenüber Nanomaterialien in der Abfallwirtschaft ist begrenzt und wird auf dem Portal nanoinformation.at wie folgt zusammengefasst: Darüber, wie sich Nanomaterialien im Recycling verhalten und inwieweit Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit bestehen, weiß man bis dato nur sehr wenig.

Eine Freisetzung von Nanomaterialien im Zuge des Recyclings bzw. bei Abfallbehandlungsprozessen ist prinzipiell bei unterschiedlichen Vorgängen (Näheres dazu unten) denkbar. Abfall- und Abwasserbehandlungsverfahren auf dem Stand der Technik halten erhebliche Anteile der im Abfall bzw. Abwasser enthaltenen Nanomaterialien zurück – es kann aber bis dato nicht ausgeschlossen werden, dass es dennoch zu einem Eintrag in die Umwelt kommen kann. Ein solcher ist insbesondere dann möglich, wenn Klärschlämme zum Düngen

³² <https://nanoinformation.at/bereiche/gesundheits/gesundheitsliche-risiken.html> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

von Ackerflächen verwendet werden. Es ist bisher auch nicht auszuschließen, dass die Nanomaterialien sich negativ auf Umwandlungs- und Abbauprozesse bei der Abwasserreinigung und Abfallbehandlung auswirken.

Zur Exposition von ArbeitnehmerInnen durch Nanomaterialien, die in Anlagen zur Abfallbehandlung freigesetzt werden könnten, liegen nur wenige Informationen vor. In Bezug auf österreichische Abfallbehandlungsanlagen gibt es aktuell weder Messwerte zu Inhalationsbelastungen noch Studien zu Hautkontaminationen.³³

6.1.3 Potenzielle Emissionsquellen von MNM im Stoffkreislauf

Das Portal nanoinformation.at nennt verschiedene Vorgänge, bei denen beim Recycling Nanomaterial-haltiger Abfälle eine Freisetzung von Nanomaterialien denkbar ist³⁴. Darüber hinaus weist es daraufhin, dass es theoretisch denkbar ist, dass Nanopartikel aus einer Lebensmittelverpackung in das Lebensmittel übergehen³⁵. Struwe et al. (2012, S. 48) wiederum zählen verschiedene Stellen im Recycling-Prozess von PET-Flaschen auf, die potenzielle Quellen für Staubemissionen darstellen. Es erscheint plausibel, dass diese potenziellen Emissionsquellen von Nanomaterialien nicht nur für den Recyclingprozess und auch nicht nur für PET-Flaschen relevant sind: Vielmehr ist davon auszugehen, dass diese als Grundlage für die Betrachtung von Expositionspotenzialen entlang des gesamten Stoffkreislaufs herangezogen werden können – sowohl bei PET-Flaschen als auch bei Kunststoffverpackungsfolien. Es lässt sich also aus den genannten Quellen ableiten, dass die Stoffkreisläufe von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien auf folgende Emissionspotenziale untersucht werden müssen, um das Expositionspotenzial zu beurteilen:

- Stäube durch Abrieb beim Sortieren, Zerkleinern, Trocknen, bei Schüttvorgängen oder beim Transport
- Auswaschungen bei Reinigungsprozessen und sonstigen Prozessschritten, bei denen das Material mit Wasser in Berührung kommt
- Dämpfe, die durch starke Hitzeeinwirkung entstehen (z.B. bei der Extrusion)
- Emissionen bei der Dekontamination (im Fall einer Aufbereitung für die Herstellung von Lebensmittelkontaktmaterialien)
- Übergang in das verpackte Lebensmittel

³³ <https://nanoinformation.at/bereiche/umwelt/entsorgung.html?L=0> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

³⁴ <https://nanoinformation.at/bereiche/umwelt/entsorgung.html> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

³⁵ <https://nanoinformation.at/bereiche/anwendungen/verpackungen.html> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

6.1.4 Aufnahmewege etwaiger Emissionen in den menschlichen Körper und in die Umwelt

Bei PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien werden Nanomaterialien entweder in Form von Überzügen (Coatings) oder Dispergierung in der Polymermatrix eingesetzt. Eine Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber MNM setzt voraus, dass es zu einer Herauslösung dieser Substanzen aus dem Überzug bzw. der Polymermatrix kommt. Im vorangegangenen Abschnitt wurden verschiedene Möglichkeiten beschrieben, wie es zu einer solchen Freisetzung kommen kann (Emissionspotenziale). Im Folgenden werden diesen verschiedenen Emissionspotenzialen relevante potenzielle Aufnahmewege in den menschlichen Körper und in die Umwelt zugeordnet:

Tabelle 4: Zuordnung der verschiedenen Emissionspotenziale hinsichtlich potenzieller gesundheitlicher bzw. umweltgefährdender Auswirkungen

Emissionsform	Relevanz für menschliche Gesundheit	Umweltrelevanz
Stäube	Wenn Nano-Staub-haltige Abluft nicht abgesaugt und gefiltert wird und es in Folge zu einer direkten Exposition von ArbeiterInnen kommt, kann es zu einer inhalativen Aufnahme von Nanopartikeln kommen. Generell gilt die Inhalation als relevantester Aufnahmeweg von Nanopartikeln in den menschlichen Körper am Arbeitsplatz ³⁶ .	Ein Eintrag in die Umwelt ist dann denkbar, wenn Abluft, die Nano-Stäube enthält, ungefiltert ins Freie gelangt.
Dämpfe	Für Dämpfe gilt das gleiche wie für Stäube – auch hier ist eine inhalative Aufnahme denkbar.	Auch bei Dämpfen ist wie bei Stäuben ein Eintrag in die Umwelt dann denkbar, wenn nanopartikelhaltige Abluft ungefiltert ins Freie gelangt.
Auswaschung	Ein direkter Kontakt des Menschen mit Nanopartikel-haltigem Abwasser scheint unwahrscheinlich.	Wenn Nanopartikel durch die Abwasserreinigung nicht entfernt werden, kann es zu einer Kontamination von Gewässern kommen. Zusätzlich können Nanopartikel auch in terrestrische Ökosysteme gelangen, wenn MNM-haltiger Klärschlamm als Dünger in der Landwirtschaft ausgebracht wird.
Übergang in Lebensmittel	Wenn Nanopartikel aus einer Verpackung in ein Lebensmittel übergehen, kann es zu einer oralen Aufnahme kommen.	Ein Eintrag in die Umwelt ist denkbar, wenn aus Lebensmittelabfällen

³⁶ <https://nanoinformation.at/bereiche/arbeitswelt/messtechnik.html?L=0> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Emissionsform	Relevanz für menschliche Gesundheit	Umweltrelevanz
		hergestellter organischer Dünger in der Landwirtschaft ausgebracht wird.

6.2 Gefährlichkeit und Expositionspotenziale von MNM bei der Kreislaufführung von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien

Gegenstand der Überlegungen in diesem Kapitel zu den Risiken von MNM und möglichen Expositionspotenzialen bei der Kreislaufführung von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien sind ausschließlich Emissionen von gezielt hergestellten, synthetischen Substanzen. Es geht also nicht um jegliche Form von Materialien in Nanogröße, sondern nur um synthetische Nanomaterialien. Grundsätzlich sei zur Frage einer etwaigen Exposition neben den folgenden Ausführungen auch auf die Kapitel 5.5.6 und 7.1.3 verwiesen.

6.2.1 Wissensstand zu Gefährlichkeit der eingesetzten MNM für Mensch und Umwelt

Im Folgenden wird beschrieben, was über etwaige Risiken für Mensch und Umwelt jener MNM bekannt ist, die in der Produktion von PET-Flaschen und/oder Kunststoffverpackungsfolien gezielt eingesetzt werden. Die hier dargestellten Informationen stammen in erster Linie vom deutschen Online-Portal [nanopartikel.info](https://www.nanopartikel.info)³⁷ – ergänzt durch Informationen des österreichischen Online-Portals [nanoinformation.at](https://www.nanoinformation.at)³⁸ – und beschränken sich auf eine grobe Zusammenfassung des Wissensstandes. Auf [nanopartikel.info](https://www.nanopartikel.info) finden sich detailliertere Informationen zu den Risiken der hier aufgezählten Substanzen.

Titandioxid (TiO₂): Die Informationen zum Risiko von Titandioxid sind widersprüchlich. Laut dem Informationsportal [nanopartikel.info](https://www.nanopartikel.info) können Titandioxid-Nanopartikel nicht auf dermalemem Weg in den Körper des Menschen eindringen und sind auch beim Verschlucken nicht giftig. Dem Portal zufolge hat Titandioxid nur in sehr großen Mengen eine giftige Wirkung. Zwar solle man das Einatmen von Titandioxid-Stäuben – wie sämtlicher Stäube – vermeiden, jedoch gebe es keine Hinweise auf außergewöhnliche Schädigungen der Lunge durch Titandioxid.³⁹

³⁷ Das Portal wird im Rahmen des Projekts „DaNa2.0 - Informationen zu Nanomaterialien und Nano-Sicherheitsforschung“ betrieben, welches von verschiedenen Forschungseinrichtungen und wissenschaftlichen Partnern betrieben wird (siehe <https://www.nanopartikel.info/ueber-uns>).

³⁸ An der Entstehung des Portals haben verschiedene Ministerien, öffentliche Institutionen, Forschungseinrichtungen und andere Partner mitgewirkt (siehe <https://nanoinformation.at/institutionen.html?L=0>).

³⁹ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/titandioxid/uebersicht-titandioxid> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Seit einiger Zeit wird jedoch auf europäischer Ebene eine Debatte geführt, ob Titandioxid als möglicherweise krebserregend eingestuft werden soll. 2017 wurde Titandioxid vom Ausschuss für Risikobewertung der EU-Chemikalienbehörde ECHA als "vermutlich krebserregend bei Inhalation" eingestuft; die EU-Kommission möchte Titandioxid als Gefahrenstoff einstufen, der mit dem Warnhinweis "möglicherweise krebserregend" gekennzeichnet werden soll. Die Hersteller widersprechen dieser Einschätzung.⁴⁰ In Frankreich wurde im Frühjahr 2019 Titandioxid in Lebensmitteln verboten⁴¹. Die Europäische Lebensmittelbehörde (EFSA) kam bei der Neubewertung von Titandioxid als Lebensmittel-Zusatzstoff im Jahr 2016 jedoch zum Schluss, dass keine Gesundheitsbedenken für VerbraucherInnen bestehen⁴².

Titannitrid (TiN): Bisher wurde kaum untersucht, ob Titannitrid-Partikel in Nanogröße gefährlich sind. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass TiN-Beschichtungen gut verträglich sind. So wird es etwa in medizinischen Implantaten verwendet.⁴³ Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) prüfte, ob TiN-Nanopartikel aus Verpackungen in verpackte Lebensmittel übergehen können – da sie keine Hinweise darauf fand, kam sie zum Ergebnis, dass der Einsatz in Lebensmittelverpackungen gesundheitlich unbedenklich ist.⁴⁴ Noch nicht bekannt ist, ob Nano-TiN für die Umwelt gefährlich ist.⁴⁵

Carbon Black (Kohlenstoffschwarz): Es gibt Hinweise darauf, dass Carbon Black schädlich für die Lunge sein kann, wenn es in größeren Mengen über einen längeren Zeitraum eingeatmet wird. Auch für Organismen in der Umwelt dürfte es nur im Fall einer Exposition von sehr großen Mengen – in der Praxis nicht realistisch – schädlich sein.⁴⁶

Nanoclay (Nanoton bzw. Schichtsilikate): Es konnte nachgewiesen werden, dass sich Nanoclay-Partikel aus Lebensmittelverpackungen herauslösen können. Dass Menschen in signifikanten Mengen direkt mit solchen Partikeln in Kontakt kommen, ist jedoch unwahrscheinlich, weil die Partikel normalerweise eingebunden sind. Von Nanoclays geht nur in hohen Konzentrationen eine Gefahr aus. Werden Nanoclay-Partikel eingeatmet, kommt es zu

⁴⁰ <https://www.dw.com/de/wie-gef%C3%A4hrlich-ist-titandioxid/a-48387575> – [Zuletzt abgerufen am 19.4.2019]

⁴¹ <https://www.spiegel.de/gesundheit/ernaehrung/titandioxid-frankreich-verbietet-weissmacher-in-lebensmitteln-a-1263406.html> - [Zuletzt abgerufen am 17.4.2019]

⁴² <https://www.ages.at/themen/lebensmittelsicherheit/zusatzstoffe/titandioxid/> – [Zuletzt abgerufen am 17.7.2019]

⁴³ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/titannitrid/uebersicht-titannitrid> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁴⁴ <https://nanoinformation.at/bereiche/anwendungen/verpackungen.html?L=0> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁴⁵ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/titannitrid/uebersicht-titannitrid> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁴⁶ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/industrieruss/uebersicht-industrieruss> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

minimalen und vorübergehenden Entzündungen in der Lunge. Zu ihrem Verhalten in der Umwelt gibt es keine Daten.⁴⁷

Zinkoxid (ZnO): Zink ist ein essenzielles Element, das der Mensch täglich mit der Nahrung aufnimmt. Dabei liegt es meistens in Form von Zinkoxid vor, welches sich im Körper auflöst. Daher ist eine Schädlichkeit für den Menschen nur in sehr hohen Dosierungen gegeben. Auch am „falschen Ort“ – wenn es z.B. als Nanopartikel in die Lunge gelangt – kann es eine giftige Wirkung haben und dazu führen, dass Zellen absterben (Zinkfieber).⁴⁸

Kohlenstoffnanoröhrchen (Carbon Nanotubes – CNT): Faserartige Materialien sind ein Problem für die Lunge, wenn sie mindestens 15-20 Mikrometer lang sind und wenn sie sehr steif sind (weil dann eine Beseitigung durch die Reinigungsmechanismen der Lunge nicht möglich ist). Das kann auch auf Kohlenstoffnanoröhrchen zutreffen. Sie können dann dazu führen, dass sich das Gewebe entzündet – was wiederum langfristig (nach 20-30 Jahren) eine Tumorbildung zur Folge haben kann.⁴⁹

Siliziumdioxid (SiO₂): Siliziumdioxid liegt in seiner Nanoform fast ausschließlich in Form von unstrukturierter (amorpher) Kieselsäure vor. Bei sämtlichen bisherigen Untersuchungen (Umweltuntersuchungen, Tierversuch etc.) gab es keine Hinweise auf nennenswerte negative Eigenschaften.⁵⁰

Silber (Ag): Silberpartikel können aus Kunststoffverpackungen in Lebensmittel übergehen und so in den Körper gelangen. In geringen Mengen haben Nanosilberteilchen keine Gesundheitsschäden zur Folge. Wenn Silber jedoch in großen Mengen und dauerhaft aufgenommen wird, kann es dazu führen, dass sich Haut und Organe grau färben. Hinweise auf eine Umweltgefährdung durch Silber gibt es bis dato nicht – für bestimmte Wildtierarten, z.B. Fisch, wirkt es jedoch toxisch. Vorsicht ist geboten bezüglich des Silbergehalts von Klärschlamm, der in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt wird.⁵¹

Kupferoxid (CuO): Wenn man Kupferoxidpulver schluckt oder Kupferoxid-Dämpfe einatmet, kann dies zu Übelkeit und Brechdurchfall führen – jedoch nur bei hohen Dosen und nur dann, wenn es zu einer Herauslösung des Kupfers aus dem Kupferoxid und damit zu seiner

⁴⁷ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/nanoclays/uebersicht-nanoclays> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁴⁸ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/zinkoxid/uebersicht-zinkoxid> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁴⁹ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/kohlenstoff-nanoroehrchen/uebersicht-kohlenstoff-nano> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁵⁰ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/siliziumdioxid/uebersicht-siliziumdioxid> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁵¹ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/silber/uebersicht-silber> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Bioverfügbarkeit kommt. In Überdosierung kann Kupfer auch zu Hautreizungen führen. Einige Tierarten reagieren deutlich empfindlicher auf Kupfer als der Mensch.⁵²

Aluminiumoxide: Aluminiumoxide werden zu den weniger gefährlichen Substanzen gezählt. Eine giftige Wirkung haben sie nur in großen Mengen. Zwar sollte man generell vermeiden, Stäube einzuatmen – für Aluminiumoxidstäube konnten jedoch keine außergewöhnlichen Lungenschädigungen nachgewiesen werden. Dazu kommt, dass Aluminiumoxid-Nanopartikel an der feuchten Luft rasch verklumpen – das reduziert den Staub, der eingeatmet werden könnte. Wenn Aluminiumoxid-Nanopartikel verschluckt werden, wirken sie nicht giftig.⁵³

6.2.2 Abschätzung der Expositionspotenziale

Inwieweit es bei der Kreislaufführung von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien zu einer Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber MNM kommen kann, ist schwer abzuschätzen. Erstens gibt es zwar Abschätzungen für mehrere Expositionsszenarien für die Herstellung, Produktion und Anwendung nanomaterialhaltiger Produkte, jedoch bis dato nur sehr wenige Expositionsszenarien im Bereich des Recyclings von Abfällen. Zweitens besteht – zumindest bei österreichischen Anwendern – große Unsicherheit über das tatsächliche Vorkommen von MNM im Stoffkreislauf von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien – und zwar sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht.

Aus diesen Gründen muss betont werden, dass es sich bei den folgenden Überlegungen zur Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber MNM aus PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien in einer Kreislaufwirtschaft in erster Linie um eine qualitative Abschätzung *potenzieller* Expositionen entlang des Lebenszyklus der beiden Stoffströme handelt. Eine Beurteilung der tatsächlichen Expositionen würde eine bessere Datenlage über das Vorkommen von MNM in den Stoffströmen sowie quantitative Messungen freierwandernder Nanopartikel an potenziellen Expositionsstellen entlang des Lebenszyklus voraussetzen. Die vorhandenen Informationen bzw. der aktuelle Wissensstand erlauben jedoch durchaus eine qualitative Abschätzung, wo potenzielle Risiken für Mensch und Umwelt und Unsicherheiten bestehen und wo dies eher nicht der Fall ist. Diese qualitative Abschätzung, wie sie im Folgenden erfolgt, kann dann als Grundlage für weitergehende Untersuchungen dienen.

⁵² <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/kupfer-und-kupferoxide/uebersicht-kupfer-und-kupferoxide> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁵³ <https://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/aluminiumoxid/uebersicht-aluminiumoxid> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

6.2.2.1 Schematische Darstellung der Stoffkreisläufe und von Expositionspotenzialen

Die im folgenden angeführten Abbildungen stellen den Stoffkreislauf von PET-Flaschen (Abbildung 4) bzw. von Kunststoffverpackungsfolien (Abbildung 5) bei einer Kreislaufführung des Materials dar und zählen für jede der Stufen des Kreislaufs *theoretische* (!)

Expositionspotenziale auf. Diese sind insbesondere überall dort zu finden, wo es zu einem der in Kapitel 6.1.3 aufgezählten Verarbeitungsschritte bzw. Vorgänge kommt, bei denen ein Freiwerden von MNM theoretisch denkbar ist. Nicht berücksichtigt ist in dieser Darstellung eine etwaige Verbrennung oder Deponierung von MNM-haltigen PET-Flaschen bzw. Folien, da diese nicht Teil der Kreislaufwirtschaft sind und somit nicht im Fokus dieser Studie stehen.

Grundsätzlich ist bei diesen Darstellungen zu beachten, dass sich die dargestellten Kreisläufe keineswegs auf die österreichische Wirtschaft beschränken müssen. Angesichts der internationalen Verflechtungen der Wirtschaft erfolgen die Stoffflüsse vielmehr grenzüberschreitend. Österreichisches Rezyklat beinhaltet neben „inländischen“ PET-Flaschen bzw. Kunststofffolien auch solche, die im Ausland produziert wurden. Außerdem muss betont werden, dass die Darstellungen jene Stellen im Kreislauf aufzeigen, wo eine aktive Zugabe von MNM erfolgen *kann*. Das heißt nicht, dass eine Zugabe derartiger Substanzen an den jeweiligen Stellen zwangsläufig erfolgt.

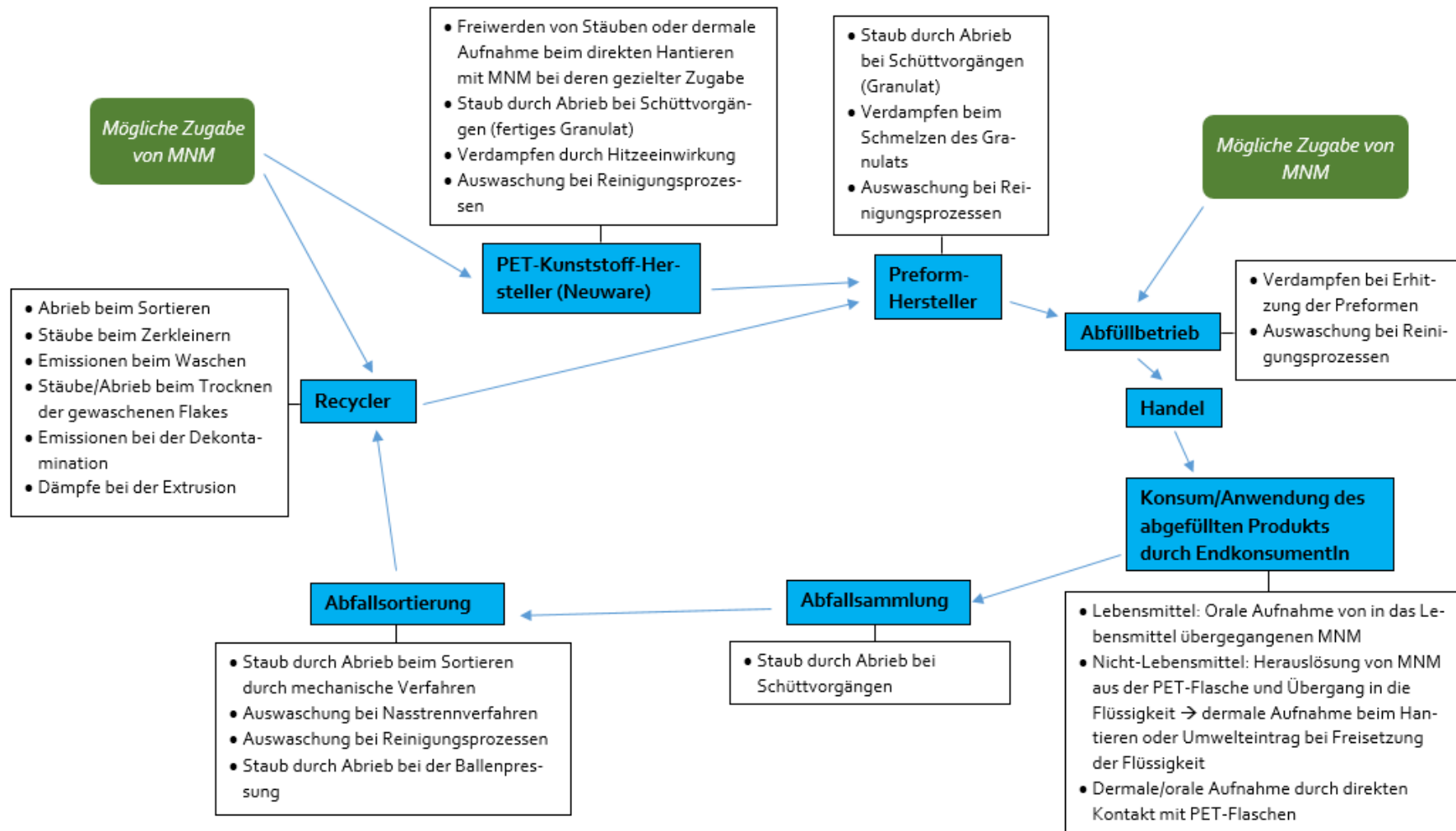


Abbildung 4: Theoretische Expositionspotenziale bei Kreislaufführung von PET-Flaschen (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf nanoinformation.at, Struwe et al. 2012, varioform.at)

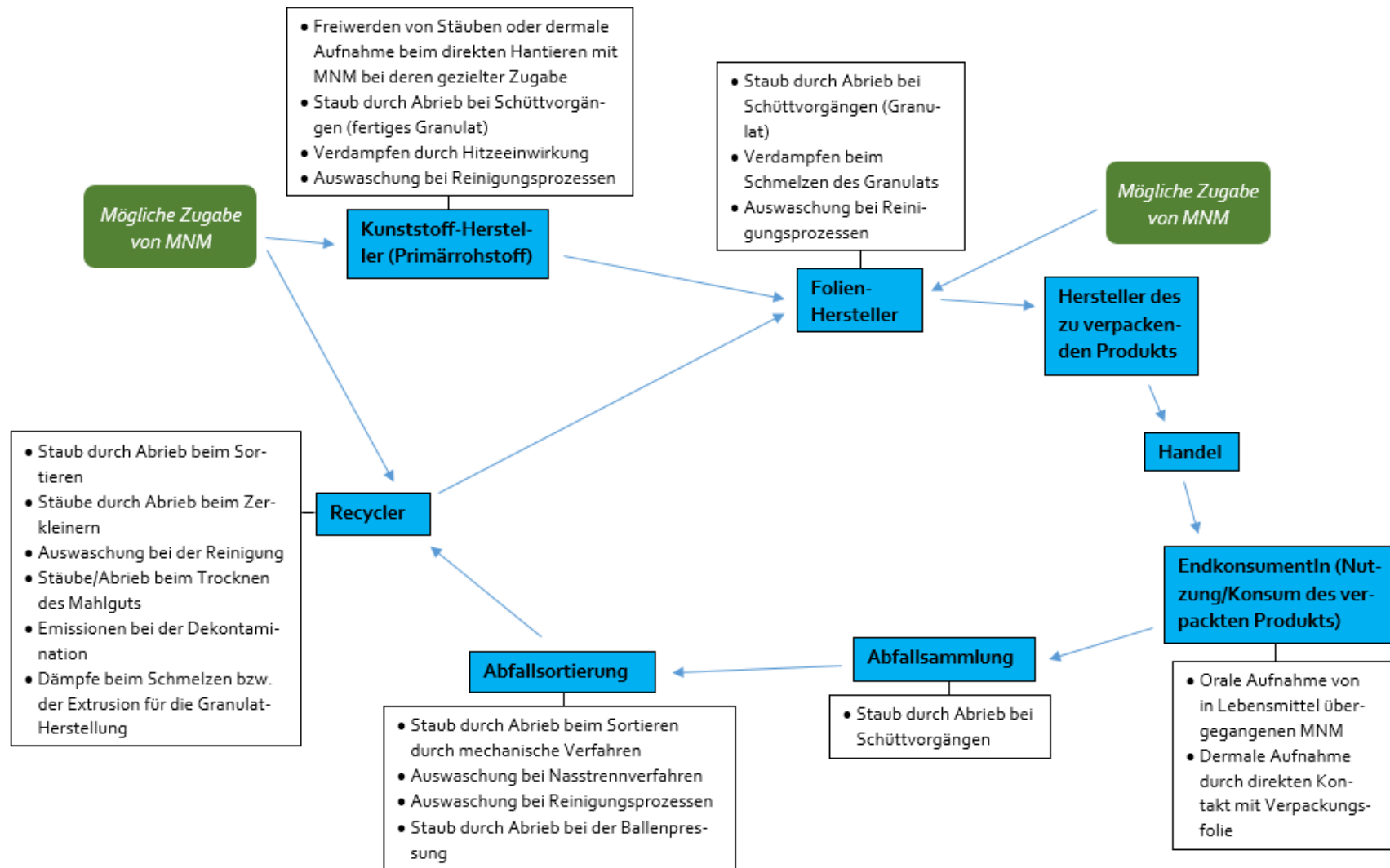


Abbildung 5: Theoretische Expositionspotenziale bei Kreislaufführung von Kunststoff-Verpackungsfolien (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf nanoinformation.at, Struwe et al. 2012)

6.2.2.2 Beurteilung der Praxisrelevanz von Expositionspotenzialen

Wie bereits erläutert, handelt es sich bei den bisherigen Ausführungen um Abschätzungen *potenzieller* – und nicht tatsächlicher – Expositionen von Mensch und Umwelt gegenüber MNM. Im Folgenden soll daher eine (qualitative) Beurteilung erfolgen, wie realistisch bzw. für die Praxis tatsächlich relevant die genannten Expositionspotenziale tatsächlich sind. Zuerst werden Faktoren beschrieben, die ein Risiko für Mensch und Umwelt begünstigen. Anschließend werden Faktoren beschrieben, die ein derartiges Risiko tendenziell mildern. Zuletzt erfolgt eine Beschreibung von Unsicherheitsfaktoren, die eine Abschätzung des tatsächlichen Risikos erschweren. Die beschriebenen Faktoren und Unsicherheiten setzen an unterschiedlichen Stellen der „Kausalkette“ an: Sie können sich auswirken ...

1. ... auf die Menge der in den Stoffkreisläufen überhaupt vorkommenden MNM
2. ... auf den Anteil jener vorkommenden MNM, die freigesetzt werden
3. ... auf den Grad der Exposition gegenüber freigewordenen MNM
4. ... auf die Gefährlichkeit von MNM für Mensch und Umwelt im Fall einer Exposition

Für diese Beurteilung wird insbesondere auf die im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop geäußerten Einschätzungen zurückgegriffen. Der Fokus bei diesen Überlegungen lag auf den Lebenszyklus-Phasen Entsorgung und Recycling.

6.2.2.2.1 Risikobegünstigende Faktoren

Faktoren, die sich auf die Menge vorhandener MNM in den Stoffkreisläufen auswirken

Importe: NM können zum einen durch gezielten Einsatz in der Herstellung von Kunststoffverpackungsfolien und PET-Flaschen in Österreich, zum anderen aber auch über Importe nach Österreich in die Stoffkreisläufe der beiden Materialgruppen gelangen. Bei den Importen gibt es zwei mögliche Einträge: über den Import von Produkten, die in MNM-haltige PET-Flaschen bzw. Kunststoffverpackungsfolien verpackt und zum Konsum in Österreich bestimmt sind; sowie über den Import von MNM-haltigen Kunststoffabfällen als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Sekundärmaterial durch die österreichische Recyclingwirtschaft. Wie im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop bestätigt wurde, stammen sowohl bei den PET-Flaschen als auch bei Kunststoffverpackungsfolien signifikante Anteile des Materials, das in Österreich recycelt wird, aus verschiedensten Ländern auf der ganzen Welt.

Aufgrund dieser Importe können einerseits MNM in den Stoffkreislauf gelangen, die österreichische Hersteller von PET-Flaschen und Verpackungsfolien selbst gar nicht gezielt einsetzen. Andererseits können Importe aus Nicht-EU-Mitgliedsstaaten dazu führen, dass MNM in Österreich in den Stoffkreislauf geraten, deren Verwendung in PET-Flaschen bzw. Kunststoffverpackungsfolien in der EU gar nicht erlaubt ist. Das dürfte zwar theoretisch nicht möglich sein, da in die EU importierte Produkte grundsätzlich auch die regulatorischen Vorgaben der EU erfüllen müssen. Im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop wurde jedoch argumentiert, dass Importe in der Praxis zu wenig kontrolliert werden und dass das geltende Recht daher nicht ausreichend durchgesetzt wird. Eine Person äußerte die Ansicht, dass dies auch mit dem Einfluss von Wirtschaftslobbys zu tun habe, denen die Politik nicht auf die Füße treten wolle. So könne man sich zum Beispiel im Fall von Importen aus China nicht auf die Korrektheit von Zertifikaten über die Beschaffenheit der Importware verlassen. Kunststofffolien aus China etwa enthielten oftmals Zinkoxid, das in Europa eigentlich verboten ist, und die Titandioxidmengen in chinesischen Kunststoffimporten seien um ein Vielfaches höher als die in Europa eingesetzten Mengen.

Die hier beschriebenen möglichen Einträge von MNM in die Stoffkreisläufe durch Importe erhöhen letztlich auch die Wahrscheinlichkeit einer Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber diesen Substanzen. Am problematischsten ist dabei insbesondere eine potenzielle Exposition durch MNM, die in der EU für PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien nicht einmal zugelassen sind.

Denkbarer Eintrag unerwünschter MNM bei Verwendung von Rezyklat aus anderen Produkten: Wenn für die Herstellung von PET-Flaschen bzw. Kunststoffverpackungsfolien Rezyklat verwendet wird, das aus anderen Produktanwendungen stammt, ist es theoretisch denkbar, dass dadurch MNM in den Stoffkreislauf gelangen, die nicht für PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien gedacht sind. Ein derartiger Eintrag in den Stoffkreislauf von PET-Flaschen und Verpackungsfolien dürfte jedoch nur bei Flaschen bzw. Folien relevant sein, die nicht als Lebensmittelkontaktmaterialien eingesetzt werden. Warum ein derartiges Risiko für Lebensmittelkontaktmaterialien nicht gegeben sein dürfte, wird weiter unten im Kapitel „Faktoren, die ein Risiko für Mensch und Umwelt mindern“ näher erläutert.

Denkbare Akkumulation von MNM: Theoretisch wäre eine mit jedem Recycling-Zyklus zunehmende Akkumulation von MNM im Material dann denkbar, sofern bei der Herstellung neuer PET-Flaschen bzw. Folien aus Sekundärmaterial das Rezyklat dergestalt gezielt mit zusätzlichen MNM versehen wird, dass sich die Konzentration des MNM im Material erhöht. Eine derartige Akkumulation würde die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von MNM entlang des Stoffkreislaufs erhöhen. Die Interviews und der ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop legten jedoch nahe, dass eine solche Akkumulation aus verschiedenen Gründen

kein plausibles Szenario sein dürfte. Diese Gründe werden im Kapitel „Faktoren, die ein Risiko für Mensch und Umwelt mindern“ näher beschrieben.

Faktoren, die die Freisetzung enthaltener MNM betreffen

Potenzielle MNM-Freisetzung bei Coatings und mögliche Zunahme von deren Einsatz: Im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop wurde die Hypothese geäußert, dass Nanopartikel bei der mechanischen Verarbeitung des Materials eher freigesetzt werden, wenn sie als Coating am Produkt aufgebracht sind und nicht in die Polymermatrix eingebunden sind. Dem wurde jedoch entgegengehalten, dass es sich bei einer Beschichtung auf SiO₂-Basis um eine vernetzte Struktur handle und dass eine Herauslösung einzelner Teilchen daher fraglich sei.

Davon abgesehen wurde im Workshop auch die Ansicht geäußert, dass es denkbar sei, dass in Zukunft Coatings bei PET-Flaschen verstärkt eingesetzt werden könnten, um die Recyclierbarkeit der Flaschen zu erhöhen. Mit Coatings können nämlich erwünschte Barriereigenschaften erreicht werden, ohne heterogene und daher schwerer recycelbare Verbundstoffe verwenden zu müssen. Zu einem solchen verstärkten Einsatz von Coatings werde es aber nur dann kommen, wenn damit keine Risiken für Mensch und Umwelt einhergehen.

Mögliche Freisetzung von MNM durch Waschung von PET-Flaschen-Etiketten: Praktisch die einzige Stelle im Stoffkreislauf, an der eine Freisetzung von MNM-Partikeln von den Workshop-TeilnehmerInnen als denkbar bezeichnet wurde, ist beim Waschprozess der PET-Flaschen – konkret bei der Entfernung der aufgedruckten Farbe von den Etiketten. Sofern Farbpigmente in Nanogröße vorlägen, könnten sie sich als Nanopartikel unter Umständen in der Waschlauge ansammeln. Die aus Titandioxid bestehende weiße Grundfarbe der Etiketten werde beim Waschprozess jedoch grundsätzlich nicht herausgelöst. Dass sich auch von dieser Grundfarbe einzelne Teilchen lösen und so in die Waschlauge geraten könnten, sei jedoch nicht auszuschließen.

6.2.2.2 Risikomindernde Faktoren

Den im vorangegangenen Abschnitt aufgezählten risikobegünstigenden Faktoren „stehen verschiedene Faktoren gegenüber, die die Wahrscheinlichkeit einer Exposition bzw. die Risiken für Mensch und Umwelt relativieren.

Faktoren, die sich auf die Menge vorhandener MNM in den Stoffkreisläufen auswirken

Verringerung der Akkumulationsgefahr durch Entnahme von MNM-haltigem Material aus Stoffkreislauf: Mehrere Personen im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop argumentierten, dass eine etwaige Akkumulation von Nanomaterial im Kunststoff eine Veränderung der Materialeigenschaften zur Folge habe. Dadurch wird Kunststoff ab einer bestimmten Konzentration an Nanomaterial für die Weiterverarbeitung zu PET-Flaschen oder Kunststoffverpackungsfolien unbrauchbar und daher bei der Sortierung / Aufbereitung des Recyclingmaterials dem Stoffkreislauf entnommen. Das verhindere das Risiko einer signifikanten Akkumulation.

Als konkretes Beispiel für diesen Mechanismus wurde im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop Carbon Black genannt. Dieses wird grundsätzlich sowohl bei PET-Flaschen als auch bei Folien eingesetzt – wenn auch bei PET-Flaschen nur in sehr geringen Mengen. Im Workshop wurde darauf hingewiesen, dass Carbon Black zu einer Verschlechterung des Materials führt, die sich auf die Weiterverarbeitung sowohl zu PET-Flaschen als auch zu Kunststofffolien negativ auswirkt. Im Fall von Flaschen wird Carbon-Black-haltiges PET aufgrund dieser Qualitätsminderung dem Stoffkreislauf entnommen und nicht mehr für die Herstellung von PET-Rezyklat für die Flaschenherstellung verwendet. (Das gilt übrigens auch für mit TiO₂ opak gefärbte Flaschen.) Im Fall von Folien kann Carbon-Black-haltiges Material höchstens noch im Rahmen eines Downcyclings für die Herstellung niederwertiger Produkte (wie z.B. Müllsäcke, Agrar- oder Baufolien) genutzt werden. Wenn jedoch der Anteil an Carbon Black zu hoch ist, ist ein Recycling gar nicht mehr möglich, weil sich aufgrund der veränderten mechanischen Eigenschaften keine Folie mehr blasen lässt. Aufgrund dieser Nachteile wird Carbon Black dem Stoffkreislauf früher oder später entnommen, was einer Akkumulation entgegenwirkt.

Verringerung der Akkumulationsgefahr durch Verdünnung: Im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop wurde sowohl in der Arbeitsgruppe zu PET-Flaschen als auch in jener zu Kunststoffverpackungsfolien folgendes Argument vorgebracht: Beim Recycling werden MNM-haltige Kunststoffe ständig mit Kunststoffen vermischt, die keine derartigen Substanzen enthalten – sofern MNM haltiger Kunststoff nicht bereits davor „ausgemustert“ wurde, weil die Additive die Stoffeigenschaften verschlechtern. So kommt es ständig zu einer „Verdünnung“ der MNM, was einer Akkumulation entgegenwirke.

Verringerung der Akkumulationsgefahr durch Downcycling bei Folien: Im Workshop wurde auch angeführt, dass Folien-Recycler für die Herstellung von Rezyklat sehr ungern

Folien verwenden, die bereits aus Recycling-Material bestehen. Auch die Interviews machten deutlich, dass bei Folien nicht von mehreren Kreislaufzyklen auszugehen ist und nur sehr bedingt werterhaltendes Recycling, vorwiegend jedoch Downcycling stattfindet. Das gilt besonders für Lebensmittelverpackungen, wie mehrere Workshop-TeilnehmerInnen bekräftigten. Diese können nicht wieder zu Lebensmittelverpackungsfolien verarbeitet, sondern nur für die Herstellung von „niederwertigeren“ Produkten verwendet werden. Dass bei Kunststoffverpackungsfolien Downcycling überwiegt, wirkt einer Akkumulation bzw. einer durch eine solche begünstigten Freisetzung von MNM entgegen.

SiO₂-Coatings scheinen bei PET-Flaschen nicht weit verbreitet zu sein: Die Aussagen im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop legen nahe, dass PET-Flaschen mit SiO₂-Coatings nicht besonders verbreitet sind. In Indien kämen in der Produktion Coatings zum Einsatz, um die Flaschen an die klimatischen Gegebenheiten anzupassen, aber grundsätzlich sei das Verfahren teuer und daher insbesondere in Europa nicht weit verbreitet. Zu diesen Aussagen im Workshop gilt es jedoch anzumerken, dass zumindest in Deutschland bei Fruchtsaft-PET-Flaschen durchaus SiO₂-Coatings zum Einsatz kommen.

Verstärkte zukünftige Verwendung von MNM bei PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien fraglich: Im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop wurden verschiedene Argumente genannt, warum es unwahrscheinlich ist, dass MNM bei PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien in Zukunft verstärkt eingesetzt werden. Erstens habe der „Hype“ um das Potenzial der Nanotechnologie abgenommen. Zweitens sei in der öffentlichen Wahrnehmung vermehrt Skepsis wahrzunehmen, weswegen Nanomaterialien nun zumindest nicht mehr als Marketingargument verwendet werden. Drittens dürfte es eine Verschiebung des MNM-Einsatzes weg von „Massenkunststoffen“ – wie etwa PET-Flaschen und Kunststoffverpackungen – hin zu Spezialanwendungen gegeben haben – nicht zuletzt deshalb, weil Nanotechnologie teuer ist. Darüber hinaus ist eine Zugabe von Additiven umso eher notwendig, je langlebiger ein Produkt sein muss – was bei PET-Flaschen und Verpackungsfolien jedoch eine untergeordnete Rolle spielt. Außerdem gibt es wachsendes Bewusstsein für die Notwendigkeit von „Design for Recycling“. Im Zuge dessen wird zunehmend auf Materialien verzichtet, die die Recyclierbarkeit von Kunststoffen hemmen – wie etwa Carbon Black und Titandioxid.

Rückgang des Einsatzes von Carbon Black zu erwarten: Der Trend zeigt einen sinkenden Einsatz von Carbon Black, hieß es beim ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop. Grund dafür ist nicht nur die Tatsache, dass Carbon die Weiterverarbeitbarkeit des Kunststoffs verringert, sondern auch, dass es zu fehlerhaften Ergebnissen bei der Infrarot-basierten Sortierung in der Abfallwirtschaft führt.

Kein signifikanter Eintrag nicht erwünschter, aus anderen Produkten stammender MNM in Lebensmittelkontaktmaterialien: In der Beschreibung von risikobegünstigenden Faktoren wurde festgehalten, dass es theoretisch denkbar ist, dass durch Recycling MNM in den Stoffkreislauf von PET-Flaschen bzw. Kunststoffverpackungsfolien gelangen können, die für diese Anwendungen eigentlich nicht gedacht sind. Bei PET-Flaschen und Verpackungsfolien, die als Lebensmittelkontaktmaterialien eingesetzt werden, ist jedoch davon auszugehen, dass dieses Risiko nicht von signifikanter Bedeutung ist. Denn laut EU-Verordnung (EG) Nr. 282/2008⁵⁴ dürfen Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die für den Lebensmittelkontakt bestimmt sind, nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn das verwendete Recyclingverfahren von der EFSA einer Sicherheitsbewertung unterzogen und zugelassen wurde. Eine Zulassung wiederum setzt voraus, dass als Recycling-Ausgangsmaterialien nur für den Lebensmittelkontakt zugelassene Materialien verwendet werden und dass – sollte das Material nicht aus einem geschlossenen Produktkreislauf stammen, wo jegliche Kontamination ausgeschlossen werden kann – nachgewiesen wurde, dass mit dem Verfahren Kontaminationen des Kunststoff-Ausgangsmaterials bis auf Konzentrationen vermindert werden können, die keine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen. Zwei interviewten ExpertInnen zufolge bedeutet das für Verpackungsfolien für den Lebensmittelkontakt in der Praxis, dass sie nicht aus Rezyklat, sondern nur aus Primärkunststoff hergestellt werden. Fazit: Es ist nicht davon auszugehen, dass MNM aus Nicht-Lebensmittelkontaktmaterialien in signifikantem Ausmaß in Lebensmittelkontaktmaterialien gelangen, in weiterer Folge in das Lebensmittel übergehen und durch orale Aufnahme eine Gesundheitsgefährdung darstellen.

Faktoren, die die Freisetzung enthaltener MNM betreffen

Freisetzung von enthaltenen MNM fraglich: Grundsätzlich ist eine Freisetzung von gebundenen Nanomaterialien, welche im Produkt fest verankert sind, eher unwahrscheinlich⁵⁵. Sowohl bei PET-Flaschen als auch bei Kunststoffverpackungsfolien werden MNM in gebundener Form eingesetzt. Dies reduziert grundsätzlich das Risiko einer Freisetzung von MNM im Zuge des Lebenszyklusprozesses. Besonders der Übergang der MNM aus einer Verpackung in ein Lebensmittel erscheint dadurch unrealistisch, und auch

⁵⁴ VERORDNUNG (EG) Nr. 282/2008 DER KOMMISSION vom 27. März 2008 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 2023/2006 – verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R0282&from=EN>

⁵⁵ <https://nanoinformation.at/bereiche/gesundheit/gesundheitliche-risiken.html> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

eine dermale Exposition durch direkten Hautkontakt mit den Folien bzw. PET-Flaschen wirkt wenig wahrscheinlich.

Fraglich ist, inwieweit gebundene MNM-Partikel bei Prozessen freigesetzt werden können, bei denen große Kräfte auf das Material einwirken (z.B. Mahlen). Im ExpertInnen- und Stakeholder-Workshop wurde überwiegend die Ansicht geäußert, dass es unwahrscheinlich ist, dass MNM-Partikel bei den verschiedenen Verarbeitungsschritten von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien freigesetzt werden – nicht zuletzt deshalb, weil MNM-haltiges Material aufgrund der Qualitätsminderung des Materials gar nicht erst in den Kreislauf zurückgeführt wird. Am ehesten ist eine Freisetzung bei der gezielten Zugabe des MNM bei der Kunststoffherstellung denkbar, da das Material an dieser Stelle noch nicht in gebundener Form vorliegt. Allerdings geht man selbst dort davon aus, dass eine direkte Exposition von Mensch und Umwelt durch bestehende Arbeitsschutzmaßnahmen verhindert wird, insbesondere da man hier um den Einsatz von MNM weiß.

Die ExpertInnen und Stakeholder im Workshop stimmten zu, dass die Entstehung von Stäuben bei den verschiedenen Verarbeitungsprozessen entlang des Stoffkreislaufs ein relevantes Thema für den Arbeitsschutz darstellt. Allerdings überwog die Ansicht, dass ein etwaiges Risiko von Polymerstäuben ausgeht und nicht von Stäuben aus MNM. Es ist anzunehmen, dass Nanopartikel auch bei der Entstehung von Stäuben in der Polymermatrix eingebunden bleiben. Insbesondere in Bezug auf Carbon Black und Titandioxid gab sich eine Person im Workshop überzeugt, dass diese sich bei der Verarbeitung im Zuge des Recyclings nicht herauslösen würden. Andernfalls wäre dies in Form schwarzer (Carbon Black) bzw. weißer (Titandioxid) Stäube gut sichtbar. (Ob das trotz der Nano-Größe tatsächlich stimmt, ist fraglich.) Was es jedoch zu bedenken gilt: Die Einschätzung, dass es zu keiner Freisetzung von MNM kommt, steht im Widerspruch zur an anderer Stelle im Workshop getätigten Aussage, dass eine Herauslösung von Nanopartikeln durch mechanische Verarbeitung denkbar sei, wenn sie in Form von Coatings aufgebracht sind, anstatt in die Polymermatrix eingearbeitet zu sein). Fest steht jedenfalls, dass eine definitive Beurteilung des Freisetzungspotenzials von Nanopartikeln in Form von Stäuben nur durch eine tatsächliche Messung möglich ist.

Die ExpertInnen bezweifelten auch, dass MNM durch Verdampfung freigesetzt werden könnten. Generell würden Kunststoff-Additive bewusst so gewählt, dass sie beim Extrudieren des Kunststoffes nicht ausdampfen – sonst wären sie ja wirkungslos. Auch bezüglich der Dekontamination von PET-Rezyklat zur Herstellung von lebensmitteltauglichen PET-Flaschen wurde die Ansicht geäußert, dass von keiner Freisetzung von Nanopartikeln auszugehen sei.

Grundsätzlich sei an dieser Stelle zur Frage der Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von MNM aus dem Material im Zuge des Recyclings auch auf Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verwiesen.

Übergang von MNM in Lebensmittel unwahrscheinlich: Ein Übergang von Nanopartikeln aus einer Verpackung in das abgepackte Lebensmittel ist sehr unwahrscheinlich, wenn die Nanopartikel – wie bei PET-Flaschen und Kunststoff-Verpackungsfolien der Fall – in eine Matrix oder in einer Schicht fest eingebettet sind.⁵⁶ Dazu kommt, dass Nanomaterialien, die in Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden, einer ausdrücklichen Zulassung durch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) bedürfen. Dabei wird das Material im Zulassungsverfahren spezifisch darauf getestet, ob die Gefahr eines Übergangs aus der Verpackung in das Lebensmittel besteht. Dass es zu einem Übergang von für Lebensmittel zugelassenen Nanomaterialien aus PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien in Lebensmittel kommt, ist daher sehr unwahrscheinlich.

Faktoren, die sich auf das Ausmaß der Exposition gegenüber freigesetzten MNM auswirken

Schutzmaßnahmen können auch bei Freiwerden von MNM Exposition verhindern: Selbst, wenn MNM freigesetzt werden, muss es keineswegs zwangsläufig zu einer Exposition von Mensch und Umwelt kommen. Der Grund dafür sind insbesondere Arbeits- und Umweltschutzmaßnahmen an den verschiedenen Stellen des Stoffkreislaufs. Was den Arbeitsschutz betrifft, haben Studien bestätigt, dass technische Schutzmaßnahmen grundsätzlich auch vor Nanopartikeln einen wirksamen Schutz bieten⁵⁷. In Bezug auf die Umwelt wird davon ausgegangen, dass moderne Abfallbehandlungsverfahren zumindest erhebliche Anteile der enthaltenen Nanomaterialien vor einem Eintrag in die Umwelt zurückhalten⁵⁸.

6.2.2.2.3 Unsicherheitsfaktoren, die eine Risikoabschätzung erschweren

Neben den risikobegünstigenden und risikomindernden Faktoren lassen sich auch die im folgenden beschriebenen Faktoren identifizieren, die eine Abschätzung des tatsächlichen Risikos erschweren.

⁵⁶ <https://nanoinformation.at/bereiche/anwendungen/verpackungen.html> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁵⁷ <https://nanoinformation.at/bereiche/arbeitswelt/wirksamkeit-der-schutzmassnahmen.html?L=0> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

⁵⁸ <https://nanoinformation.at/bereiche/umwelt/entsorgung.html?L=0> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Fehlende Informationsflüsse in Richtung Abfallentsorger und -recycler: Was die Abschätzung des tatsächlichen Expositionspotenzials bei der Kreislaufführung so schwierig macht, ist der Informationsmangel zur spezifischen Beschaffenheit von Abfällen, die als Ausgangsmaterial für das Recycling verwendet werden. Dieser Mangel könnte verhindern, dass adäquate Schutzmaßnahmen gegen eine etwaige Exposition getroffen werden. Ein Grund für dieses Informationsdefizit ist, dass es – mit Ausnahme von Lebensmitteln und Kosmetika – bis dato keine Pflicht zur Kennzeichnung von MNM in Produkten gibt. Außerdem habe sich die generelle Bereitschaft von Unternehmen, in ihren Produkten enthaltene Nanomaterialien zu kennzeichnen, verringert, weil diese in der öffentlichen Wahrnehmung in den letzten Jahren in Verruf gekommen seien, wie im Workshop argumentiert wurde. Dazu kommt, dass für Nanoabfälle derzeit keine getrennte Sammlung und keine gesonderte Kennzeichnung oder Behandlung vorgeschrieben ist⁵⁹.

Auch auf explizite Nachfrage von Seiten der Wissenschaft, von Entsorgern oder von Recyclern geben die Hersteller von Primärkunststoff praktisch keine Informationen über die Zusammensetzung der Additive heraus, die sie ihrem Kunststoff beimischen. Dieses Problem wurde im Workshop von verschiedensten Stakeholdern besonders betont. Selbst über die Zusammensetzung von Farben bekäme man fast keine Auskünfte. Diese Verschlossenheit habe auch viel mit dem Schutz vor Konkurrenz zu tun. Daher sei es selbst beim Recycling von gut sortiertem post-industriellem Kunststoff (z.B. Ausschussware aus der Produktion) für den Recycler schwierig, genaue Informationen über die Beschaffenheit des Materials in Erfahrung zu bringen.

Bei Recycling von post-consumer Fraktionen sind erst recht keine Informationen über deren genaue Beschaffenheit und über den Gehalt von MNM vorhanden, wie im Workshop betont wurde. Etwaige vom Hersteller bereitgestellte Informationen (z.B. über das Sicherheitsdatenblatt) gelangen nicht bis zum Entsorger und zum Recycler. Dazu kommt, dass es für die Abfallverwerter angesichts der enormen Heterogenität der Abfälle nicht möglich ist, die Zusammensetzung der Abfälle durch aktive Informationseinholung von den Herstellern zu eruieren.

Fehlende Messungen der enthaltenen MNM: Ein weiterer Grund für das Informationsdefizit zu MNM im Stoffkreislauf liegt darin, dass zurzeit weder der MNM-Gehalt im Material noch deren Emission bei der Verarbeitung spezifisch gemessen wird. Vom Recycler werde das Material nur auf Kriterien geprüft, die für die Weiterverarbeitung relevant sind (insbesondere Farbe, mechanische oder chemische Eigenschaften). Additive an sich würden aber nicht analysiert. Die genannten Eigenschaften können zwar mit dem Gehalt von MNM

⁵⁹ <https://nanoinformation.at/bereiche/umwelt/entsorgung.html> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

zusammenhängen (z.B. bei Carbon Black oder Titandioxid), doch ein solcher Zusammenhang muss nicht zwangsläufig gegeben sein. Deswegen lässt die Messung der Materialeigenschaften keine eindeutigen Rückschlüsse auf den MNM-Gehalt zu. Eine Person im Workshop meinte etwa, dass z.B. das Vorhandensein von Polyamid als Co-Polymer in einer PET-Flasche mit der üblichen Spektralanalyse nicht nachgewiesen werden könne und dass es dementsprechend auch denkbar sei, dass z.B. mit freiem Auge nicht sichtbare Nanobeschichtungen im Ausgangsmaterial des Recyclers unentdeckt bleiben können.

6.2.2.3 Fazit zu etwaigen Risiken für Mensch und Umwelt

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt: Auf der einen Seite bestehen Unsicherheiten, aufgrund derer nicht ausgeschlossen werden kann, dass es zu einer Exposition und in weiterer Folge zu Risiken für Mensch und Umwelt kommt. Auf der anderen Seite stehen dem eine Reihe von Faktoren gegenüber, die eine Exposition und derartige Risiken unwahrscheinlich erscheinen lassen.

Unterm Strich ergibt sich der Eindruck, dass es derzeit kaum Hinweise auf konkrete und unmittelbare Gefahren für Mensch und Umwelt durch eine Exposition gegenüber MNM im Zuge einer Kreislaufführung von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien gibt. Angesichts bestehender substanzieller Wissenslücken „zu den Eigenschaften der Nanomaterialien, den Bedingungen einer Wiederfreisetzung im Recycling und den auf absehbare Zeit bestehenden Defiziten bei der Staubmessung“ (Struwe et al. 2012, S. 38) können Gefahren aber wie gesagt auch nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Struwe et al. (2012, S. 38) hatten 2012 konstatiert, dass bis dato nicht bewiesen worden sei, „dass in Aufbereitungsverfahren von nanomaterialhaltigen Konsumprodukten keine Nanomaterialien [...] freigesetzt werden“. Somit bestehe „theoretisch ein Risiko, dass ohne wirksame Präventivmaßnahmen [...] durch potenziell nanomaterialhaltige Stäube in Recyclingprozessen gesundheitliche Risiken entstehen können“.

Außerdem muss berücksichtigt werden: Bei den beiden untersuchten Produktgruppen ist davon auszugehen, dass die Kreislaufführung zunehmen wird. Denn zum einen gibt es generell einen Trend in Richtung Kreislaufwirtschaft. Zum anderen hat die EU im Rahmen des Kreislaufwirtschaftspakets vorgeschrieben, dass die Recyclingrate bei Kunststoffverpackungen in den kommenden Jahren erhöht werden muss. Durch die verstärkte Kreislaufführung wird die Frage nach einer möglichen Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber MNM beim Recycling voraussichtlich an Relevanz gewinnen.

Angesichts der bestehenden Unsicherheiten sei auf das Vorsorgeprinzip verwiesen, demzufolge Präventionsmaßnahmen auch bei fehlender Gewissheit getroffen werden sollen.

Derartige Präventionsmaßnahmen umfassen vor allem Arbeits- und Umweltschutzmaßnahmen. Im Kapitel 6.4 („Weitere Handlungsfelder und Forschungsbedarf“) werden darüber hinausgehende Maßnahmen und bestimmte Prinzipien, die bei allen Aktivitäten im Umgang mit potenziellen Risiken aus MNM beachtet werden sollten, beschrieben.

6.3 Bewusstsein der Stakeholder zum Thema MNM

Ziel des ExpertInnen- und Stakeholder-Workshops und der Interviews war es, zu erheben, inwieweit es ein Bewusstsein für das Thema MNM bei den Stakeholdern, die mit PET-Flaschen bzw. Kunststoffverpackungsfolien zu tun haben gibt. Dieses scheint kaum ausgeprägt zu sein – die meisten von ihnen gaben an, vorher mit der Thematik als solcher noch nicht konfrontiert worden zu sein. Zwar sind sie durchaus mit bestimmten Substanzen konfrontiert, bei denen es sich um MNM handelt bzw. die teilweise auch in Nanogröße vorliegen können. Es fehlte jedoch oft ein Bewusstsein darüber, dass diese Substanzen unter Umständen als MNM einzustufen sind. Im Zuge des Workshops hielten die ExpertInnen und Stakeholder überwiegend an der Ansicht fest, dass von synthetischen MNM in PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien keine signifikanten Risiken für Mensch und Umwelt ausgehen. Auf dem Weg hin zu einer Kreislaufwirtschaft gebe es wesentlich drängendere Probleme. Wenn es bei PET-Flaschen und Verpackungsfolien ein Problem mit Nanomaterialien gebe, dann nicht mit synthetischen Nanopartikeln, sondern noch am ehesten mit (Nano-)Polymerstäuben, die bei der Verarbeitung des Kunststoffs unabsichtlich entstehen. Die Stakeholder äußerten teilweise die Sorge, dass die Beschäftigung mit theoretischen Risiken ohne ausreichende Evidenz für tatsächlich bestehende Probleme nur zu einer unnötigen Verunsicherung der KonsumentInnen führen könnte.

6.4 Weitere Handlungsfelder und Forschungsbedarf

Wie können genauere Kenntnisse über die Risiken, die von MNM im Stoffkreislauf ausgehen, gewonnen werden? Und wie kann mit bestehenden besser umgegangen werden? Diese Fragen werden im Folgenden mit konkreten Handlungsempfehlungen und Hinweisen auf Forschungsbedarf von Seiten der Workshop-TeilnehmerInnen beantwortet. Im Anschluss daran werden allgemeine Prinzipien beschrieben, die beachtet werden sollten, wenn Maßnahmen zum Umgang mit potenziellen Risiken von MNM gesetzt werden.

Empfehlungen der Workshop-TeilnehmerInnen für konkrete Maßnahmen

- **Vertiefende Risikoabschätzung:** Eine Empfehlung aus dem Workshop war die Durchführung einer vertiefenden Risikoabschätzung. Bis dato gebe es keine ausreichenden Hinweise, dass überhaupt ein signifikantes Problem vorliegt. Eine vertiefende Risiko-Einschätzung könne unter Umständen verhindern, dass unnötig viele Ressourcen in präventive oder sonstige Maßnahmen trotz mangelnder Notwendigkeit gesteckt werden.
- **Messungen der Freisetzung bzw. des Gehalts von MNM:** Inwieweit es im Zuge einer Kreislaufführung von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien tatsächlich zu einer Freisetzung von MNM kommt, lässt sich letztlich nur durch Messungen eruieren. Messungen sind deshalb ein zentrales Instrument im Rahmen einer vertiefenden Risikoabschätzung. Besonders spannend wäre dabei die Frage, ob es für die Freisetzung einen Unterschied macht, ob Nanomaterialien als Coating aufgebracht werden oder ob sie in die Polymermatrix eingebunden werden. In Bezug auf die Frage einer möglichen Akkumulation von MNM schlug eine Person im Workshop angesichts divergierender Einschätzungen dazu, wie realistisch eine Akkumulation von MNM im Zuge der Kreislaufführung ist, gezielte Experimente vor, bei denen ein Material zuerst mehrfach recycelt und dann auf den MNM-Gehalt hin untersucht wird.
- **Design for Recycling:** Die Workshop-TeilnehmerInnen waren sich einig, dass es grundsätzlich einen Paradigmenwechsel hin zu „Design for Recycling“ braucht. Das bedeutet etwa, in der Produktion auf Additive so weit wie möglich zu verzichten. Insbesondere in Bezug auf Farbeigenschaften sei das gut denkbar, weil es nicht zu einem Verlust an Funktionalität führt. Auf der einen Seite wurde argumentiert, dass das die Akzeptanz der KonsumentInnen für veränderte Farb- bzw. Produkteigenschaften voraussetzt. Andererseits wurde dem entgegengehalten, dass eine bloße Verhaltensänderung einzelner KonsumentInnen keinen ausreichenden Anreiz für Hersteller darstellt, ihre Produktion umzustellen. Vielmehr brauche es eine Besteuerung sämtlicher Praktiken, die ein Recycling erschweren – wie eben auch die Zugabe bestimmter Additive.
- **Verstärkte Importkontrollen:** Angesichts der unzureichenden Durchsetzung europäischer Standards bei importierten Gütern wegen mangelnder Kontrollen sei es notwendig, Importkontrollen auszuweiten bzw. Importgesetze zu verbessern. Eine Person im Workshop schlug dabei eine Umkehrung der Beweislast vor, sodass Importeure aktiv nachweisen müssen, dass ihre Produkte die europäischen Standards erfüllen.

- **Maßnahmen zur Verbesserung verfügbarer Informationen über Produktbeschaffenheit:** Sowohl die Wissenschaft als auch die Abfallverwerter wünschen sich Maßnahmen, die dazu führen, dass Hersteller mehr bzw. bessere Informationen über die Produktbeschaffenheit bereitstellen. Eine der Personen im Workshop argumentierte, eine Nicht-Weitergabe von Informationen müsse finanziell sanktioniert werden. Gleichzeitig wurde darauf verwiesen, dass eine bessere Bereitstellung von Informationen durch die Hersteller zumindest für Verwerter von post-consumer Abfällen nur sehr bedingt von Nutzen wäre, da diese Informationen kaum nicht bis zu ihnen gelangen würden.
- **Beschäftigung mit gezielter Rückgewinnung nanoskaliger Wertstoffe:** Eine Person im Workshop empfahl, das Thema „Nanomaterialien im Recycling“ nicht nur im Hinblick darauf zu behandeln, wie sich Additive in Nanogröße als „Störstoffe“ auf das Recycling anderer Materialien auswirken: Vielmehr wäre es lohnenswert, sich auch mit der gezielten Rückgewinnung von nanoskaligen Wertstoffen zu beschäftigen, wie zum Beispiel Kohlenstoffnanoröhrchen, die auch in Kunststoffen eingesetzt werden. Das Risiko einer Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber MNM sei bei einer gezielten Rückgewinnung dieser Materialien vermutlich wesentlich relevanter als beim „normalen“ Recycling von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien.

7 Prüfmethoden für MNM im Recyclingprozess

7.1 Allgemeine Betrachtung zu Prüfmethoden für NMN/AM

Es muss grundsätzlich zwischen Prüfmethoden und allgemeinen analytischen Methoden unterschieden werden. Prüfmethoden dienen in der Werkstoffprüfung zur Bestimmung der Werkstoffqualität bzw. der Prüfung auf Anwesenheit oder Abwesenheit von bestimmten Stoffen oder Verunreinigungen. Sie sind häufig genormt und somit Teil bestimmter Regelwerke, Standards oder Richtlinien unter der Hoheit nationaler oder internationaler Gremien wie z. B. Austrian Standards, DIN, OECD, CEN oder ISO. Analytische Methoden zum Nachweis, zur qualitativen oder quantitativen Bestimmung, zur Charakterisierung und zur Identifizierung von MNM sind in der wissenschaftlichen Literatur direkt als methodenorientierte Veröffentlichungen oder indirekt im Methodenteil einer umfassenderen Studie dokumentiert. Sie müssen nicht (und sind in der Mehrzahl nicht) genormt sein und die Qualität der Methodenbeschreibung (und die einer u.U. durchgeführten Validierung) lässt eine Anwendung in einem regulierten System (z.B. zum ArbeitnehmerInnenschutz) nicht immer zu.

Betrachtet man Prüfmethoden im Kontext von MNM in Produkten und deren Verarbeitung/Recycling und der möglichen Emission in die Umwelt und somit Exposition von Lebewesen, so können Prüfmethoden jeweils für die beiden Komponenten der Risikoabschätzung einzusetzen sein. Zum einen für die Bestimmung der Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber diesen Materialien (Exposition - Quantifizierung der Menge an MNM in einem bestimmten Medium an einem bestimmten Ort) und der potenziellen Wirkung auf Organismen (Gefährdungspotenzial - toxikologische Betrachtung). In diesem Projekt sollen jedoch lediglich Prüfmethoden für die mögliche Emission von MNM aus den unterschiedlichen Verarbeitungsschritten während des Recyclingprozesses betrachtet werden. Im Fokus stehen daher Methoden, die die ausgewählten, für die beiden Fallbeispiele relevanten MNM im Abfallmaterial und dem Recyclat sowie den in Kapitel 6 identifizierten Emissionspfaden nachweisen und/oder quantitativ bestimmen können. Grundsätzlich muss zwischen vier abgestuften Fragestellungen unterschieden werden:

1. Sind Nanopartikel im Produkt vorhanden → Detektion ohne weitere Unterscheidung oder Quantifizierung aber u.U. mit Angabe von Größenverteilungen zur Unterscheidung von Partikeln, die laut herrschender Definition nicht MNM zugeordnet werden können.

2. Welche Arten von Nanopartikeln sind im Produkt vorhanden → Identifikation von MNM und Unterscheidung von natürlichen oder unbeabsichtigt in Prozessen anfallende (incidental) Nanopartikel.
3. Wieviel MNM sind im Produkt vorhanden → Quantifizierung in Form von Massen- oder Anzahlkonzentration des MNM mit Angabe von Größenverteilungen
4. Welche Eigenschaften hat das identifizierte MNM → Charakterisierung durch Erfassung weiterer Eigenschaften wie Partikelform, Oberflächeneigenschaften, Dichte, Härte, Steifigkeit, Agglomerationsgrad, Einbettung/Gebundenheit in einer Matrix.

Der Begriff „Produkt“ kann auch durch „Probe“ ersetzt werden, wie z.B. Luft, Wasser, Abwasser oder Abfall. Für die Fallbeispiele Kunststoffflaschen und Verpackungskunststoffe inkl. Folien kann davon ausgegangen werden, dass im Produkt/Recyclat detektierte MNM technischen Ursprungs sind. Es ist relativ unwahrscheinlich, dass unbeabsichtigt Nanopartikel in das Produkt/Recyclat gelangen oder aus der Umgebung stammende, natürliche Nanopartikel in den zu erwartenden > ppm Konzentrationen auftreten. Daher ist in den Fallbeispielen der Punkt 2 für die Produkt-/Recyclatanalyse und für das Migrationsmedium zu vernachlässigen, da alle detektierten Nanopartikel dem Produkt und den in ihm enthaltenen MNM zuzurechnen sind. Für luftgetragene und im Abwasserstrom befindliche Partikel gilt dies so stringent nicht, da sich darin auch Nanopartikel aus natürlichen Quellen, unspezifischen anthropogenen Quellen wie Wandfarbabrieb oder anderen Verarbeitungsbereichen des Betriebes befinden können. Nanotone zählen zu den natürlichen Partikeln, da sie natürlichen Materialien entstammen, in diesem Fall jedoch in hohen Konzentrationen beabsichtigt zugesetzt werden und somit zu den MNM zuzurechnen sind.

7.1.1 Prüf- und analytische Methoden für MNM

Methoden zur Analyse und Charakterisierung von reinen und matrixfreien MNM sind vielfach beschrieben und zum Teil hochentwickelt (Unger 2019). Chemische Zusammensetzung, Partikelgröße- und Form, Mineralogie, Kristallisationsgrad, spezifische Oberfläche, Oberflächenchemie und viele weitere Parameter lassen sich auf Basis von Partikelpopulationen oder z.T. auch auf Einzelpartikelebene bestimmen. Bildgebende Verfahren wie die Elektronenmikroskopie (Rasterelektronenmikroskopie: SEM, Transmissionselektronenmikroskopie: TEM), spektrometrische Verfahren wie die energiedispersive Röntgenspektrometrie (ED-XRF), Röntgenbeugung (XRD), Infrarotspektrometrie (FT-IR), optische Elementspektrometrie (ICP-OES) und induktive gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) sowie Lichtstreuungstechniken (dynamische Lichtstreuung: DLS, Laser-Diffraktometrie: LD) sind einige klassische Verfahren zur Analyse von MNM im reinen Zustand (Unger 2019).

Die Analyse von MNM wird erheblich erschwert, wenn die Materialien in einer Matrix vorliegen (Wagner et al. 2015) und ganz besonders dann, wenn in der Matrix Partikel ähnlicher Zusammensetzung und Größe/Form vorkommen, die aber nicht NMN zuzurechnen sind und/oder die Matrix eine Isolation der Partikel für eine Analyse erschwert. Diese Fremdpartikel können aus natürlichen Quellen stammen oder in Prozessen unbeabsichtigt entstanden sein (Gondikas et al. 2018). In den hier betrachteten Fallbeispielen ist diese Unterscheidung für den Luft- und Wasserpfad notwendig, da viele der zu berücksichtigenden MNM einen relevanten natürlichen Hintergrund aufweisen und Partikel ähnlicher Zusammensetzung im Staub und Abwasser vorkommen. In diesen Fällen ist nicht nur die Bestimmung des nanopartikulären Anteils notwendig, sondern auch eine Unterscheidung der Partikelherkunft. Dies kann mit modernen Methoden in bestimmten Fällen geleistet werden, z.B. über unterschiedliche Zusammensetzung oder Reinheit von NMN und natürlichen Partikeln (Praetorius et al. 2017, Navratilova et al. 2015), stellt aber immer noch eine große Hürde bei der spezifischen Bestimmung von MNM in komplexen Proben dar (Wagner et al. 2015, Gondikas et al. 2018). In den meisten Fällen ist eine Methode spezifisch für das vorkommende MNM unter Berücksichtigung der Matrix und der erwarteten Konzentration des MNM zu wählen. Auf standardisierte Verfahren kann hier praktisch nicht (Gondikas et al. 2018, Deering et al. 2008, Taboada-Lopez et al. 2019) zurückgegriffen werden, da diese bisher nur für wenige Kombinationen entwickelt und validiert wurden (Wagner et al. 2015, von der Kammer et al. 2011, Linsinger et al. 2013). Es ist das Ziel dieses Projektes sinnvolle Prüf- und Analyseverfahren für die unterschiedlichen MNM in den jeweiligen Produkten und Expositionsszenarien vorzuschlagen. Da keine oder nur wenige Studien zu den ganz spezifischen analytischen Fragestellungen existieren, muss mit einer weiteren Methodenentwicklung gerechnet werden, die zitierte Literatur soll hier Hilfestellung leisten.

7.1.2 Prüf- und analytische Methoden für NMN in PET-Flaschen und Kunststofffolien

Wie bereits dargestellt bestimmt die Kombination von MNM, Matrix und die Anwesenheit von Nanopartikeln nicht technischen oder nicht-intentionellen Ursprungs welche Kombination an Probenaufbereitung und Messtechnik zielführend für den Nachweis und die Quantifizierung von MNM sein kann.

Ausgehend von den zu erwartenden Zuschlagstoffen (Kapitel 6.2.1) und der Matrix ergeben sich folgende mögliche Analysenverfahren:

Röntgendiffraktometrie (XRD): Geeignet für kristalline MNM und Tonminerale. Da die Kristallstruktur erfasst wird ist die Methode spezifisch für Partikel. Geeignet für die Detektion der Anwesenheit. Keine voll-quantitative Information über die Konzentration der MNM im

Kunststoffmaterial. Die Kunststoffprobe muss aufbereitet werden, wie z.B. vermahlen für ein Pulver-Diffraktogramm (Eckardt et al. 2012), es kann aber auch eine Folie oder ein Kunststoff-Pellet so zugeschnitten werden, dass eine Messung möglich ist. Eine Entfernung der Kunststoffmatrix oder Extraktion der MNM ist nicht notwendig (direkte Messung) (Fiamegos & Guntinas 2018). Als Standardmethode kann DIN EN 13925-1 *Zerstörungsfreie Prüfung - Röntgendiffraktometrie von polykristallinen und amorphen Materialien - Teil 1: Allgemeine Grundlagen*, sowie DIN EN 13925-2 *Zerstörungsfreie Prüfung - Röntgendiffraktometrie von polykristallinen und amorphen Materialien - Teil 2: Verfahrensabläufe* herangezogen werden. Aus dem amerikanischen ASTM wäre D5380-93 zu nennen: *Identification of Crystalline Pigments and Extenders in Paint by X-Ray Diffraction*.

Röntgenfluoreszenz (XRF): Geeignet zur Detektion von vielen Elementen aus denen sich die anorganischen MNM zusammensetzen. Direkte Analyse in der Kunststoffmatrix (Chaqmaqchee et al. 2017, Thermo Scientific Application Note: 41658). Eine Entfernung der Kunststoffmatrix oder Extraktion der MNM ist nicht notwendig (direkte Messung). Halb-quantitative bis quantitative Bestimmung des Elementgehalts möglich, je nachdem ob geeignete Kalibrierstandards verfügbar sind. Eine spezifische Detektion von Partikeln ist nicht möglich. XRF-Spektrometer sind als Laborgeräte verfügbar. Tragbare Feld-XRF-Spektrometer weisen üblicherweise eine geringere Empfindlichkeit auf, bei Zuschlagmengen im g/kg-Bereich sollten sie jedoch anwendbar sein und würden eine schnelle und unkomplizierte Analytik im Produktionsprozess ermöglichen. Die Anwendbarkeit müsste jedoch noch nachgewiesen werden.

Fourier Transform Infrarotspektroskopie (FT-IR): Einsetzbar zur Bestimmung von vielen Tonmineralien in der Kunststoffmatrix (Ritz et al. 2010). Direkte Analyse in der Kunststoffmatrix. Eine Entfernung der Kunststoffmatrix oder Extraktion der MNM ist nicht notwendig (direkte Messung). Halb-quantitative bis quantitative Bestimmung des Elementgehalts möglich, je nachdem ob geeignete Standards verfügbar sind. Eine spezifische Detektion von Partikeln ist möglich. Überlagerung des IR-Spektrums des Kunststoffes kann eine Bestimmung des Tongehaltes erschweren oder unmöglich machen.

Thermogravimetrie (TGA): Nutzt die unterschiedlichen Pyrolyse- oder Verbrennungstemperaturen der kohlenstoff-basierten Substanzen PET und PE (niedrige Temperatur) und Carbon Black oder CNTs (höhere Temperaturen) (Pang et al. 1993, Application Note, TA Instruments TA122). Kann in Kombination mit IR Spektrometrie und Massenspektrometrie bessere Unterscheidung liefern als mit Temperaturabhängigkeiten allein.

Elementspektrometrie (ICP-OES, ICP-MS) (Taylor 2001, Garbarino et al. 1998): Kann den Gehalt der meisten konstituierenden Elemente der MNM in der Kunststoffmatrix quantitativ sehr genau bestimmen (Echegoyen 2016, Goodlaxson et al. 2018, Cho & Myung 2011). Eine Ausnahme sind in jedem Fall C, O, H, N. Eine Identifizierung von partikularen Anteilen ist mit der klassischen Analytik jedoch nicht möglich, da die Analyse nach Zerstörung der Matrix und Auflösung der Partikel erfolgt. Die Zerstörung der Matrix (Kunststoff, Filtermembranen) ist Routine, jedoch kann die Mineralsäure-basierte Zerstörung der Kunststoffmatrix (PET, PE) auch im Druckaufschluss unvollständig sein (Echegoyen 2016, Goodlaxson 2018). Die meisten der Zuschlagstoffe werden mit dem Mineralsäure-Mix zur Zerstörung der Matrix mit aufgelöst und können so direkt gemessen werden. Bei Ti und Si-basierten MNM muss zur vollständigen Auflösung ein Schritt mit HF/HNO₃ (Ti, Si) oder H₂SO₄ (Ti) hinzugefügt werden.

Einzelpartikel ICP-MS (spICP-MS) (Mozhayeva & Engelhard 2019): Die seit einigen Jahren für die Nanopartikelanalytik entwickelte Einzelpartikel-ICPMS (spICP-MS) ist in der Lage partikelspezifisch MNM in Partikelgröße und Partikelanzahlkonzentration zu quantifizieren. Die Partikel müssen dafür in Reinstwasser dispergiert sein. Hierbei werden die Partikel als kurzzeitiges, pulsartiges Signal in hoher Zeitauflösung (typ. 50 µs – 10 ms) erfasst. Das Partikel-Ereignis, in dem das Partikel im Plasma zerstört und die konstituierenden Elemente ionisiert werden, ist nur etwa 300 bis 1000 µs lang. Typischerweise können nur ein oder maximal zwei Isotope innerhalb eines solchen Messfensters von rund 1 ms gemessen werden (Quadrupol und Sektorfeld-Massenspektrometer). Mit Hilfe der Flugzeitmassenspektrometrie (spICP-TOFMS) ist es möglich praktisch das gesamte Element Spektrum, das der ICP-MS Technik zugänglich ist, simultan in einem Partikel zu erfassen. Diese Technik steht aber weltweit nur in einer sehr geringen Zahl an Forschungslaboren zur Verfügung (2019: <10). Die obere Messgrenze für die Partikelgröße ist etwa 1 µm, die untere Messgrenze für die Partikelgröße variiert je nach gemessenem Isotop, der Partikeldichte, dem verwendeten Gerät, der gelösten-Konzentration des beobachteten Isotops in der Probe, der Massenfraktion des Isotops im Partikel und dem Massenanteil des Isotops an dem Element. Die minimal erfassten Elementmassen liegen z.T. unterhalb des fg-Bereichs und entsprechen in etwa 5 nm (Au-NPs, Sektorfeld-ICPMS) bis 100 nm (SiO₂-NP, Quadrupol ICP-MS). Die Technik entwickelt sich jedoch kontinuierlich weiter.

Es ist zu bedenken, dass die unteren Messgrenzen für die hier betrachteten MNM z.T. recht hoch liegen (SiO₂, TiN, TiO₂, Tone) und bei Messung nur eines Isotops die Unterscheidung von natürlichen oder nicht-intentionellen Partikel nur für solche gelingen kann, deren Hintergrund-Konzentration vernachlässigbar ist.

Darüber hinaus müssen die MNM in eine stabile, wässrige Dispersion überführt werden und Partikelgrößen > 1 µm vor der Analyse entfernt werden. Dies geschieht üblicherweise durch

Sedimentation, Zentrifugation oder Filtration. Da bei allen diesen Trennverfahren auch Partikel $< 1 \mu\text{m}$ verloren gehen können, ist die korrekte Anzahlkonzentration nur schwer zu bestimmen. Da der Partikel-Durchgang durch eine Membran durch Anlagerung der Partikel an der Membran oder Bildung eines Filterkuchens nicht immer vollständig ist kann eine Abtrennung über eine Membran mit einer Ausschlussgröße $> 1\mu\text{m}$ sinnvoll sein. Daher wird die Verwendung von $5 \mu\text{m}$ Membranen empfohlen. Die wenigen Partikel zwischen 1 und $5 \mu\text{m}$ stören die Analytik nicht und für Partikel $< 1 \mu\text{m}$ kann ein vollständigerer Membrandurchgang erwartet werden.

Elektronenmikroskopie (SEM/TEM): Aufgrund der hohen Hintergrundkonzentration an Staubpartikeln oder Schwebstoffen in Luft oder (Ab-)wasser, die den hier diskutierten MNM-Zuschlagstoffen in Zusammensetzung, Art und Form sehr ähnlich sind, kann eine spezifische Bestimmung meist nur auf Einzelpartikelanalyse durch bildgebende Verfahren erfolgen. Aufgrund der Partikelgrößen der MNM kommen nur elektronenmikroskopische Verfahren in Betracht und durch die Art der Proben und Probennahme hauptsächlich Rasterelektronenmikroskopie (SEM). Auch für die PET-Materialien und PE-Folien ist eine spezifische Identifizierung mit bildgebenden Verfahren am sichersten. Elektronenmikroskopische Untersuchungen an Kunststoffen oder Filterrückständen sind Routine und werden von kommerziellen Laboren angeboten. Nachteil ist der große technische und Zeitaufwand.

Für die Analyse von MNM im Recyclingprozess können Bestimmungen zur Anwesenheit von MNM in den Kunststoffmaterialien, in Aerosolpartikeln im Verarbeitungsbetrieb, in Partikeln im Wasch-, Spül- und Abwasser und bei Verpackungsfolien auch in Simulantien von Migrationstests relevant werden.

Kunststoffmaterialien PET und PE

Für die Fragestellung der Anwesenheit bzw. Abwesenheit von MNM in PET-Kunststoff oder Verpackungsfolien sind direkte Verfahren, die die Anwesenheit von Partikeln und/oder Beschichtungen und/oder deren Identität bestimmen können, geeignet. Dazu eignen sich zerstörungsfreie spektroskopische oder Lichtstreuverfahren solange die Kunststoffmatrix und andere Zuschlagstoffe wie Pigmente das Signal der MNM nicht überlagern und die MNM in ausreichender Konzentration vorliegen. In reinem PET mit MNM als Zuschlagstoff scheinen je nach Nanomaterial Röntgendiffraktometer (XRD), Röntgenfluoreszenz (XRF) und Infrarotspektrometrie (FT-IR) ausreichende Nachweisstärken zu haben. Während XRD und FT-IR das Mineral detektieren und somit spezifisch Partikel identifizieren können, misst die XRF lediglich die Elementkonzentration eines Ziel-Elements (z.B. Ti bei TiN) und kann nicht

zwischen partikulärem Material und z.B. einer Beschichtung oder ionischen Beimischung unterscheiden.

In Material-Mischproben, in denen die mit MNM versetzten PET Kunststoffe oder Folien nur eine kleine Fraktion stellen, wie z.B. nach der Zerkleinerung unterschiedlicher Flaschentypen, kann der Anteil an MNM in der resultierenden Mischprobe zu gering sein um noch detektiert werden zu können. Außerdem stellt sich hier die Frage der Homogenität des Probenmaterials. Bei PET-Pellets von etwa 0,5 cm Größe könnte immer nur etwa ein Pellet der Analyse zugeführt werden. Es müsste also eine größere Probenmenge vor der Analyse homogenisiert werden. Hierzu eignen sich zunächst Schlag- oder Schneidmühlen solange die Glasktemperatur von 70°C für PET nicht überschritten wird und, um eine höhere Endfeinheit des Mahlguts zu erreichen, Cryo-Kugelschwingmühlen die mit flüssigem Stickstoff soweit abgekühlt werden, dass der Kunststoff spröde wird.

Bei niedrigeren Zuschlagskonzentrationen $\ll 1\%$ oder in einer Mischprobe mit geringen Anteil an mit MNM-versetztem Material kann nach Zerstörung der Kunststoffmatrix und Auflösung der MNM eine klassische ICP-OES oder ICP-MS Analytik erfolgen. Diese kann jedoch nur auf die anorganischen MNM angewandt werden und nicht auf kohlenstoff-basierte MNM. Auch wird hier nur der Elementgehalt gemessen und ein spezifischer Nachweis von Partikeln ist nicht möglich.

Für kohlenstoffbasierte MNM wie Carbon Black und CNTs ist die Anwendung der Thermogravimetrie möglich.

Luftpfad und Aerosole

Wie bereits erwähnt ist die Freisetzung einzelner, isolierter MNM aus dem Recyclingprozess als Aerosol unwahrscheinlich (Gohler et al. 2013, Gohler et al. 2010). Insofern muss für einen Nachweis von Kunststoff-Aerosolpartikeln mit MNM der Luftstaub im Betrieb mit klassischen Verfahren gesammelt werden und mit Hilfe von Elektronenmikroskopie die Kunststoff-MNM Partikel von dem Hintergrund-Feinstaub/Aerosolen unterschieden werden. Eine Sammlung kann auf Filtermembranen erfolgen. Zur Unterscheidung von Partikelgrößen können Impaktoren verwendet werden (Pallares et al. 2019).

Grundsätzlich wäre auch ein Aufschluss des Filters und Analyse auf die konstituierenden Elemente der MNM möglich, jedoch sind die Hintergrundkonzentrationen der meisten davon so hoch, dass eine spezifische Identifizierung nicht möglich erscheint.

Unspezifische Aerosol-Monitore sind kommerziell in verschiedenen Varianten verfügbar. Das Messprinzip basiert im einfachsten Fall auf Laser-Lichtstreuung, allerdings sind Kondensations-Partikelzähler empfindlicher für kleine Partikel. Differentielle Mobilitätsanalysatoren können zusätzlich Partikelgrößenverteilungen liefern. Es werden jedoch alle Arten von Aerosolen/Feinstaubpartikeln erfasst. Eine Unterscheidung ist nicht möglich.

Wasserpfad

Auch hier ist eine Freisetzung einzelner, isolierter MNM aus dem Recyclingprozess unwahrscheinlich, jedoch können sehr geringe Mengen von an der Oberfläche der Materialien befindlichen MNM ins Wasser migrieren (Echegoyen et al. 2016). Neben Sammlung auf Filtern und elektronenmikroskopischer Untersuchung kann für anorganische MNM auch die Einzelpartikel-ICP-MS eingesetzt werden um diese Anteile zu bestimmen. Hierfür empfiehlt sich die Abtrennung größerer Partikel mithilfe einer Filtration über z.B. 5µm Filtermembranen. Jedoch ergibt sich auch im Wasserpfad das Problem der Unterscheidung von Partikeln aus anderen, z.T. natürlichen Quellen.

Migration aus Produkten

Es existieren Standard-Testverfahren zur Untersuchung der Migration von Zusatzstoffen aus Nahrungsmittelverpackungen in eine Anzahl ausgewählter flüssiger Medien. Diese Medien sollen unterschiedliche Arten von Nahrungsmitteln simulieren (Simulantien). Es wird daher die entsprechende Richtlinie zur Prüfung und Bewertung von Verpackungsmaterialien aus Kunststoff in der Verordnung (EU) Nr. 10/2011 vom 14. Januar 2011 "über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen" herangezogen und eine Migration in Wasser und 10% Ethanol/Wasser berücksichtigt. Es muss dabei bedacht werden, dass dieses Verfahren nicht speziell für partikuläre Stoffe entwickelt wurde.

Grundsätzlich, für anorganische MNM, sollte hier die Einzelpartikel-ICPMS eingesetzt werden. Sie liefert den Nachweis partikulärer Stoffe, kann parallel den Gehalt gelöster Ionen, die von diesen Stoffen ebenfalls freigesetzt werden können, erfassen und besitzt eine hohe Empfindlichkeit bezüglich der Anzahlkonzentration. Da eine Anwesenheit natürlicher oder nicht-intentioneller Partikel gleicher oder ähnlicher Zusammensetzung ausgeschlossen werden kann, ist der Nachweis auch spezifisch für MNM.

Die in den beiden Anwendungsfällen PET und PE gezielt eingesetzten MNM sind in (Kapitel 6) aufgeführt. Tabelle 5 stellt mögliche Analysenverfahren den jeweiligen Materialien in unterschiedlicher Matrix gegenüber.

Tabelle 5: Vorschläge für die analytische Methodik für das jeweilige MNM und die berücksichtigte Matrix

Material	in Produkt (Polymer)	Luftpfad	Wasserpfad	Migration aus Produkt ⁶⁰
Titannitrid (TiN)	Analyse auf [Ti] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) und HF/HNO ₃ -Aufschluß (*); XRD-Analyse auf TiN; XRF Analyse auf [Ti] _{ges} (*); SEM-EDX Analyse	Sammeln auf Filtermembran, Analyse mit SEM-EDX; Aufschluss des Filters und Analyse mit ICP-OES oder –MS (*)(**); Ultraschall-extraktion des Filters gefolgt von spICP-MS nach Filtration über 5µm Filter (**)(***); Aerosol-Monitor (nicht spezifisch für Ti) ****)	Analyse auf [Ti] _{ges} mit ICP-OES nach Aufschluss (*); Filtration über 5 µm-Filter, Analyse mit spICP-MS auf Ti (Tharaud et al. 2017) (***) Unterscheidung von natürlichen Ti-haltigen Partikeln schwierig (Loosli et al. 2019). (**)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit spICP-MS auf Ti (Donovan et al. 2016) (***)).
Titandioxid (TiO₂)	Analyse auf [Ti] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) und HF/HNO ₃ -Aufschluß (*); XRD-Analyse auf TiO ₂ ; XRF Analyse auf [Ti] _{ges} (*) SEM-EDX Analyse	Sammeln auf Filtermembran, Analyse mit SEM-EDX; Aufschluss des Filters und Analyse mit ICP-OES oder –MS (*)(**); Ultraschall-extraktion des Filters gefolgt von spICP-MS nach Filtration über 5µm Filter (**)(***); Aerosol-Monitor (nicht spezifisch für Ti) ****)	Analyse auf [Ti] _{ges} mit ICP-OES nach Aufschluss; Filtration über 5 µm-Filter, Analyse mit spICP-MS auf Ti (Tharaud et al. 2017) (***) Unterscheidung von natürlichen Ti-haltigen Partikeln schwierig (Loosli et al. 2019). (**)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit spICP-MS auf Ti (Donovan et al. 2016) (***)).
Carbon Black	TGA TGA-IR TGA-MS Färbung bei höheren Gehalten UV-VIS zum Ausschluss von organischen Schwarzpigmenten	Sammeln auf Filtermembran, Analyse mit SEM ****)	k.A.	Filtration des Extraktionsmediums über < 10.000g/mol MWCO-Filter, SEM-EDX

⁶⁰ Hierfür wird die entsprechende Richtlinie zur Prüfung und Bewertung von Verpackungsmaterialien aus Kunststoff in der Verordnung (EU) Nr. 10/2011 vom 14. Januar 2011 "über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen" herangezogen und eine Migration in Wasser und 10% Ethanol/Wasser berücksichtigt.

Material	in Produkt (Polymer)	Luftpfad	Wasserpfad	Migration aus Produkt ⁶⁰
Nanoclay	Analyse auf [Al] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) (*); XRD-Analyse; SEM-EDX Analyse	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Al] _{ges} ****)	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Al] ****)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit splCP-MS auf Al (**).
Zinkoxid (ZnO)	Analyse auf [Zn] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) (*); XRF-Analyse auf [Zn] _{ges} (*); SEM-EDX Analyse	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Zn] _{ges} ****)	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Zn] ****)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit splCP-MS auf Zn (**).
Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT)	TGA TGA-IR TGA-MS TG-IR-MS	Sammeln auf Filter mit nachfolgender SEM Analytik	Filtration der Wasserprobe über < 10.000g/mol MWCO-Filter, SEM-EDX Analyse	Sammeln auf Filter mit nachfolgender SEM Analytik
Siliziumdioxid (SiO₂)	XRF Analyse auf [Si] _{ges} für Filmbeschichtung und Beimischung von NP. Analyse auf [Si] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) und HF/HNO ₃ -Aufschluss SEM-EDX Analyse für Beimischung von NP	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Si] _{ges} ****)	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Si] ****)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit splCP-MS auf Si (**).
Silber (Ag)	Analyse auf [Ag] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) (*); XRF-Analyse auf [Ag] _{ges} ; SEM-EDX Analyse	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Ag] _{ges} Aufgrund der geringen Hintergrundkonzentration von Ag ist Rückschluss auf Ag-haltige MNM möglich	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Ag] ****) Aufgrund der geringen Hintergrundkonzentration von Ag ist Rückschluss auf Ag-haltige MNM möglich	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit splCP-MS auf Ag (Donovan et al. 2016) (**).
Kupferoxid (CuO)	Analyse auf [Cu] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Cu] _{ges} ****)	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Cu] ****)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-

Material	in Produkt (Polymer)	Luftpfad	Wasserpfad	Migration aus Produkt ⁶⁰
	(Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) (*); XRF-Analyse auf [Cu] _{ges} ; SEM-EDX Analyse			Filter, Analyse mit splCP-MS auf Cu (***)).
Nanozellulose	SEM-EDX Analyse	Sammeln auf Filtermembrane, SEM-EDX Analyse	Filtration der Wasserprobe über < 10.000g/mol MWCO-Filter, SEM-EDX Analyse	Filtration des Extraktionsmediums über < 10.000g/mol MWCO-Filter, SEM-EDX Analyse
Graphen	Kostenintensives Material, daher Beimischung eher unwahrscheinlich TGA TGA-IR TGA-MS	k.A.	k.A.	k.A.
Aluminiumoxide	Analyse auf [Al] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) (*); XRD-Analyse SEM-EDX Analyse	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Al] _{ges} ****)	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Al] ****)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit splCP-MS auf Al (***)).
Magnesiumoxid (MgO)	Analyse auf [Mg] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) (*); XRD-Analyse SEM-EDX Analyse	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Mg] _{ges} ****)	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Mg] ****)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit splCP-MS auf Mg (***)).
Halloysite-Nanotubes (HNT)	Analyse auf [Al] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) (*); XRD-Analyse SEM-EDX Analyse	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Al] _{ges} ****)	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Al] ****)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit splCP-MS auf Al (***)).
Calciumcarbonat	Analyse auf [Ca] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016,	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Ca] _{ges} ****)	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Ca] ****)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse

Material	in Produkt (Polymer)	Luftpfad	Wasserpfad	Migration aus Produkt ⁶⁰
	Goodlaxson et al. 2018) (*); XRD-Analyse SEM-EDX Analyse			mit splCP-MS auf Ca (***)).
Schichtsilikate (modifizierte Montmorillonite)	Analyse auf [Al] _{ges} mit ICP-OES nach Zerstörung der Matrix (Echegoyen et al. 2016, Goodlaxson et al. 2018) (*); XRD-Analyse SEM-EDX Analyse	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Al] _{ges} ****)	Wie für TiO ₂ , Analyse auf [Al] ****)	Filtration des Extraktionsmediums über 5 µm-Filter, Analyse mit splCP-MS auf Al oder Si (***)).

*) keine direkte Information über Partikelgehalt oder Art der Partikel, da zur Analytik aufgelöst oder nicht spezifisch erfasst

**) es können nicht-MNM Partikel aus anderen Quellen miterfasst werden, Unterscheidung schwierig oder nicht möglich

***) Partikel unter einer Grenzgröße von ~20 nm (CuO, Ag, ZnO), ~40 nm (TiO₂, TiN, Tone) und ~60 nm (SiO₂) werden nicht erfasst. Grenzgröße hängt von verwendetem ICP-MS und Probenparametern ab.

****) Die Hauptelemente, aus diesen solche MNM bestehen, haben eine sehr hohe Hintergrundkonzentration in Stäuben. Sie können daher nur durch eine elektronenmikroskopische Analyse sicher von Hausstaub-Partikeln unterschieden werden.

7.1.3 Partikuläre oder ionische Freisetzung

Diverse Untersuchungen haben gezeigt, dass in eine Polymermatrix eingebundene Nanopartikel nicht oder nur in verschwindend kleinen Mengen freigesetzt werden (Echegoyen et al. 2016, Neubauer et al. 2017). Die Diffusion der Partikel innerhalb der Polymermatrix ist praktisch vernachlässigbar und so können nur oberflächennahe oder beim Herstellungsprozess auf der Oberfläche abgelagerte Nanopartikel überhaupt emittiert werden. Dies konnte auch für Nanopartikel in fragmentierten (zermahlenden) und gealterten Proben (Eisenoxid in LDPE) gezeigt werden (Neubauer 2017). Dies ergibt sich aus dem Umstand, dass es sehr hohe Energien erfordert Materialien überhaupt bis in den Nanometer-Bereich zu zerteilen und gerade Polymere aufgrund ihrer Elastizität und/oder Fließfähigkeit unter höheren Temperaturen oder Drücken dieser Zerkleinerung gut widerstehen. Die Abtrennung der Nanopartikel aus dem Polymer ist dabei ähnlich erschwert wie die Zerteilung des Polymers selbst. Wobei berücksichtigt werden muss, dass das Zermahlen/Zerteilen zu einer größeren spezifischen Oberfläche der Polymermatrix führt, bei der dann in nachfolgenden Prozessen wiederum mehr Nanopartikel oberflächennah einer Herauslösung unterworfen sein können. Schleifversuche an Lackoberflächen, die nanoskalige, mineralischen Pigmente wie TiO₂ enthielten, haben gezeigt, dass unter dem hohen mechanischen Stress zwar nanoskalige Partikel emittiert werden, jedoch keine einzelnen,

freigesetzten Pigmentpartikel im Aerosol auffindbar waren. Auch hier fand eine Trennung Nanopartikel-Lackmatrix nicht statt (Gohler et al. 2013, Gohler et al. 2012, Vorbau et al. 2009).

Die Emission von Nanoclay aus LDPE Verpackungsfolien findet in Nahrungsmittelsimulantien (3 % Essigsäure bzw. 40% Ethanol) zu einem überwiegenden Teil in ionischer Form statt und bleibt auch hier insgesamt sehr gering (< 3% des in der Folie eingesetzten Nanoclays). Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass auch Silber-NP aus typischen Verpackungsfolien im Regelfall aufgelöst und als Silberionen emittiert werden und die partikuläre Emission eine sehr untergeordnete Rolle spielt (Endbericht Nano-Metalle in Food Contact Materials, FFG Projekt Nummer 835348).

Für den Anwendungsfall Recycling von PET Flaschen kann daher davon ausgegangen werden, dass die Emission unter mechanischem Stress (Zerkleinern, Abrasion bei Schüttvorgängen) hauptsächlich als undifferenzierte Staubpartikel stattfinden wird. Wobei die Staubpartikel in der Zusammensetzung dem ursprünglichen Material entsprechen, jedoch die Emission von einzelnen Nanopartikeln des Zuschlagstoffes eher untergeordnet ist.

Bezogen auf den Wasserpfad beim Recycling von MNM-haltigen PET Flaschen besteht die Möglichkeit der Herauslösung oder der Auflösung der Partikel in das Waschmedium. Auch hier können prinzipiell nur oberflächennahe MNM Partikel emittiert werden. Eine Auflösung oberflächennaher Partikel kann für mittel bis leicht lösliche MNM postuliert werden, wenn die Aufenthaltszeit im Waschmedium lang genug ist und der pH-Wert des Waschmediums eine Auflösung ermöglicht.

Tabelle 6: Löslichkeiten und daraus resultierende Freisetzungsart für die berücksichtigten MNM

Material	Löslichkeit in Wasser bei pH > 5	Freisetzung
Titannitrid (TiN)	< 1 ppm	Partikulär
Titandioxid (TiO ₂)	< 1 ppm	Partikulär
Carbon Black	< 1 ppm	Partikulär
Nanoclay	< 1 ppm	Partikulär
Zinkoxid (ZnO)	~ 100 ppm @ pH7	tw. gelöst
Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT)	< 1 ppm	Partikulär
Siliziumdioxid (SiO ₂)	< 1 ppm (< pH 9)	partikulär (< pH 9)
Silber (Ag)	~ 10 ppm ⁶¹	tw. gelöst
Kupferoxid (CuO)	~ 1 ppm	tw. gering gelöst
Nanozellulose	< 1 ppm	partikulär
Graphen	< 1 ppm	partikulär
Aluminiumoxide	< 1 ppm (< pH 8)	partikulär (< pH 8)
Magnesiumoxid (MgO)	~ 100 ppm	tw. gelöst
Halloysite-Nanotubes (HNT)	< 1 ppm	partikulär
Calciumcarbonat	~ 20 ppm	tw. gelöst
Schichtsilikate (modifizierte Montmorillonite)	< 1 ppm	partikulär

Emissionspotenzial am Beispiel nano-TiO₂ in PET.

Es wird auf Basis von Grundannahmen die maximal zu erwartende Partikelkonzentration in einem Spül-/Waschwasser von PET-Kunststoffen beim Flaschenrecycling ermittelt.

⁶¹ Literaturdaten schwanken erheblich für die Löslichkeit in sauerstoffhaltigem deionisierten Wasser (50 µg/L- 1 g/L)

Grundannahmen:

PET: Dichte 1.35 g/cm³, Pelletgröße Ø 5 mm, sphärisch.

TiO₂-MNM Zuschlagstoff, Dichte 4.24 g/cm³, Partikelgröße Ø 50 nm, sphärisch.

MNM im PET: 1% Zuschlag von TiO₂ in das PET, Partikel aus einer Oberflächen-Grenzschicht von 300 nm Dicke (6 x Partikeldurchmesser) können freigesetzt werden.

Daraus ergibt sich folgendes Emissionspotenzial:

Masse der maximal emittierbaren MNM in der Grenzschicht: 3.6 mg/kg PET.

Anzahl der maximal emittierbaren Partikel: 1.3x10¹³/kg PET.

Fallbeispiel: 100% der oberflächennahen Partikel werden freigesetzt, 10% TiO₂-PET im Abfallstrom, 10L Waschwasser pro 1 kg PET: 0,036 mg/L nano-TiO₂ im Waschwasser.

Die getroffenen Annahmen sind konservativ und entsprechen zum heutigen Zeitpunkt einem Worst-Case. Sie lassen sich auf alle schwerlöslichen MNM in ähnlicher Weise übertragen, lösliche MNM werden entsprechende Ionenkonzentrationen erzeugen und ihr partikulärer Anteil entsprechend geringer ausfallen. Die zu erwartenden Konzentrationen sind laut Fallbeispiel sehr niedrig.

8 Kooperation von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung

Die in Kapitel 8.1 und 8.2 identifizierten und beschriebenen Kooperationsformate von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung basieren ausschließlich auf Erfahrungen und Informationen zu nationalen Formaten in den Ländern *Deutschland, Niederlande und der Schweiz*, in welchen so wie in Österreich Nanoaktionspläne erarbeitet wurden. Zu diesem Zweck wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber telefonische Fachgespräche mit ExpertInnen aus diesen drei Ländern⁶² geführt, ergänzt durch weiterführende Sekundärinformationen.

Die Diskussion möglicher Kooperationsformate im Kontext österreichischer F&E Förderung in Kapitel 8.3 basiert auf der Analyse dieser Fachgespräche vor dem Hintergrund möglicher Handlungsoptionen für den Auftraggeber sowie auf einer eingehenden und systematischen Reflexion zu möglichen Kooperationsformaten mit ExpertInnen aus dem Projekt, die ihrerseits langjährige Praxiserfahrungen mit Kooperationsfragen in Zusammenhang mit Nano-Sicherheitsforschung und Innovationsforschung aufweisen.

Die identifizierten und beschriebenen Kooperationsformate⁶³ haben nahezu ausschließlich den Fokus auf Kooperationen von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung in Zusammenhang mit Nanomaterialforschung und -entwicklung bis hin zum Prototypen gerichtet, und werden weniger in Zusammenhang mit Recycling und Entsorgung gebracht. Letzteres gewinnt jedoch an Bedeutung. Nichtsdestotrotz scheint das Kooperationsthema in dieser Phase des Lebenszyklus noch vergleichsweise unterbelichtet.

⁶² Insgesamt wurden im Rahmen der Fachgespräche 8 internationale ExpertInnen aus den Ländern Deutschland, Niederlande und der Schweiz befragt, die ihrerseits in relevanten Fachministerien, Förderagenturen oder Forschungsorganisationen tätig sind.

⁶³ Anmerkung: Die Beschreibung und Analyse der Kooperation von Nano-Sicherheitsforschung und Materialinnovatoren hat jene Formate im Fokus, wo es zu einer direkten/persönlichen Kommunikation und Kooperation kommt. Die indirekte Kooperation über die Bereitstellung von Tools und Leitfäden die bspw. von Sicherheitsforschern und Risikoanalysten konzipiert wurden und den Unternehmen zur Verfügung gestellt werden, wird/werden nicht im Detail nicht näher beschrieben; diese Formate finden aber unter dem Unterpunkt „Tools und Instrumente“ beispielhafte Erwähnung. Die folgende Auflistung der Kooperationsformate erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, spiegelt jedoch zentrale Ansätze wider.

Nationale Aktionspläne für Nanotechnologie als Ausgangspunkt

In den drei untersuchten Ländern wurden nationale Aktionspläne und Roadmaps zu Nanotechnologie erarbeitet.⁶⁴ Dadurch wurde dem öffentlichen/politischen Willen Ausdruck verliehen, sich dem Thema Nanomaterialien (NM) stärker zu widmen und gemeinsame Anstrengungen, auch ressortübergreifend, zu unternehmen, damit auch Risikofragen in Zusammenhang mit NM geklärt und Handlungsansätze/Lösungen für die Entwicklung und Nutzung von sichereren NM, auch entlang des Lebenszyklus, auf den Weg gebracht werden. In diesen Aktionsplänen wurde die jeweilige nationale Strategie formuliert und folglich wurden auch Initiativen gestartet, welche nicht nur die Entwicklung von neuen und vielversprechenden NM zum Ziel, sondern auch die Kenntnis zu möglichen Risiken und Chancen von (solchen) NM zum Gegenstand hatten.

In solchen Initiativen⁶⁵ wurden/wird daher gezielt neues sicherheitsrelevantes Wissen und Know-how zu NM generiert⁶⁶, und die Sensibilisierung zu Risiken und Chancen von NM in Wirtschaft und Gesellschaft ist seither gewachsen. So wurde beispielsweise in der Schweiz eine Gruppe zwischen Forschern (Materialinnovatoren, Toxikologen, TA und Foresight), Industrie und Konsumentenverbänden initiiert, die sich halbjährlich/jährlich trifft⁶⁷. Dabei wurde eine Vernetzung zwischen den Stakeholdern aufgebaut und das Vertrauen geschaffen, dass Behörden und SicherheitsforscherInnen/RisikobewerterInnen nicht „dogmatisch“ sind, sondern in erster Linie Interesse an guten, sicheren und damit wettbewerbsfähigen Produkten der Industrie haben.

Gleichzeitig entstand auch die Frage bzw. der Handlungsbedarf, wie man dieses nutzbringende Wissen und die Expertise aus der Sicherheitsforschung und Risikobewertung der Wirtschaft, den Materialinnovatoren/Innovationsforschern direkt zur Verfügung stellen könnte; und zwar mit dem Ziel, Bewusstsein und Know-how über Sicherheitsaspekte von NM früh in den Entwicklungsprozess einfließen zu lassen, ohne dass die Sicherheitsforschung als

⁶⁴ Vergl.: <https://statnano.com/policydocuments>

⁶⁵ In der Schweiz gab es bspw. ein nationales 4 Jahres F&E Programm zu „Risiken und Chancen von Nanomaterialien“, in den Niederlanden das Sub-Programm „Risk Analysis and Technology Assessment“ oder in Deutschland existiert gegenwärtig die Fördermaßnahme NanoCare 4.0 als eigener Sicherheitsforschungsschwerpunkt für NM als Teil des Materialforschungsprogrammes „Vom Material zur Innovation“.

⁶⁶ Bspw. zu neuen Testmethoden, Gruppierungsansätzen, Validierung von Testmethoden für bestimmte Nanomaterialien oder deren Charakterisierung, zu Ökobilanzen und Nachhaltigkeit von synthetischen NM oder auch „Hotspotstudien“ zu Umweltwirkungen verschiedener NM-Wertschöpfungsketten.

⁶⁷ Format: halber Tag, 1 bis 2 Vorträge mit anschließender Diskussion.

„Innovationskiller“ empfunden wird, sondern eine unterstützende und innovationsfördernde Rolle für Materialinnovatoren und nachgeschaltete Anwender (v.a. KMU⁶⁸) einnimmt. Eine Rolle in einer Partnerschaft in der die Innovatoren den Input aus der Sicherheitsforschung als Mehrwert sehen, wenn sie entweder sicherheitsrelevante Fragen selber nicht beantworten bzw. entsprechend adressieren können oder auch nicht wissen, welche Sicherheitsfragen zum jeweiligen Zeitpunkt im Innovationsprozess überhaupt relevant werden können.

Vor diesem Hintergrund wurden von Seiten der Politik, in Zusammenarbeit mit Forschung und Wirtschaft, Instrumente und (Förder-)Formate initiiert und geschaffen, welche die nutzbringende **Kooperation von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung** intensivieren und das Bewusstsein für Gesundheitsaspekte von NM weiter stärken sollen.

Basierend auf den gegenständlichen Projektrecherchen in den genannten drei Ländern werden diese Instrumente und Kooperationsformate entlang der zwei Kategorien „Sensibilisierung und Konsultation bei Sicherheitsfragen“ (Kapitel 8.1) sowie „Geförderte Forschungsprojekte“ (Kapitel 8.2) zusammenfassend beschrieben. In Kapitel 8.3 werden mögliche Kooperationsformate im Kontext österreichischer F&E Förderung diskutiert.

8.1 Sensibilisierung und Konsultation bei Sicherheitsfragen

In Zusammenhang mit Sensibilisierung und Konsultation bei Sicherheitsfragen wurden im Wesentlichen zwei Formate identifiziert: „Tools und Instrumente“ sowie die „Nationale Kontaktstelle“ in der Schweiz.

8.1.1 Tools und Instrumente

In der Schweiz und den Niederlanden wird u.a. der Ansatz „Faster to fail“ bzw. „Safe-by-Design“ verfolgt. Darunter wird verstanden, dass Sicherheits- und Gesundheitsfragen sowie mögliche Risiken in Zusammenhang mit NM bereits in der Frühphase von

⁶⁸In Deutschland bspw. kommen die entwickelten Methoden und Verfahren nicht nur den ProjektnehmerInnen direkt zugute, sondern etwa über Forschungseinrichtungen und öffentliche Einrichtungen wie die Forschungsüberbehörden (bspw. BAuA) fließen diese Erkenntnisse und neuen analytischen Möglichkeiten auch im Rahmen von Empfehlungen in Regulierungen sowie in die Verbesserung/Aktualisierung von bspw. Sicherheitsdatenblättern (bessere und validere Daten) ein, was wiederum den nachgeschalteten Anwendern (hauptsächlich KMU) mehr (Rechts-) Sicherheit gibt, die sich auf das sicherheitsrelevante Wissen, das ihnen übermittelt wird, verlassen können müssen.

Materialentwicklungsprojekten von Innovatoren/Unternehmen mitberücksichtigt werden sollen. Unternehmen sollen dabei in ihren Kapazitäten und in ihrem Know-how unterstützt werden, sich möglicher Risiken bei NM früh bewusst zu werden, damit sie ihren diesbezüglichen Handlungsbedarf erkennen und auch entsprechend entscheiden können, was vielversprechende Entwicklungspfade im Design solcher NM sind und welche frühestmöglich aus Sicherheits-/Risikogründen oder auch aus regulatorischen Gründen, Kostengründen, Kundenvorbehalten oder mangelnden Marktperspektiven nicht begangen werden sollten, um einen (wirtschaftlichen) Misserfolg später in der konkreten Produktentwicklung zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurden/werden von Seiten der Sicherheits- und Risikoforscher nutzerorientierte Instrumente und Werkzeuge entwickelt, welche es Innovatoren/Unternehmen bereits in der Frühphase erlauben sollen, den Bedarf in Hinblick auf Sicherheit von NM besser und von Vorhinein abschätzen und entsprechende Handlungsbedarfe identifizieren sowie konkrete Maßnahmen setzen zu können.

Einer der ersten Werkzeuge dieser Art ist der „Vorsorgeraster“⁶⁹ in der Schweiz, wo Wirtschaftsunternehmen Online und anonym entlang einer logischen Abfolge Fragen in Zusammenhang mit NM stellen/beantworten und somit indirekt in Austausch mit der Expertise von Sicherheitsforschern/Regulatoren treten können. Dieser Vorsorgeraster ermöglicht Firmen eine unternehmensinterne Primärverortung in Zusammenhang mit der Entwicklung und Nutzung von NM und dient in der Frühphase auch als ergänzendes Tool für die unternehmensinterne Bewertung im Bereich Qualitätssicherung und Projektmanagement von NM F&E. Laut Aussagen von ExpertInnen aus der Schweiz hat der Vorsorgeraster viel zur Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette beigetragen, da die Nutzung des Vorsorgerasters auf Lücken im Sicherheitsdatenblatt aufmerksam gemacht und die Kommunikation zwischen Hersteller und nachgeschaltetem Anwender zu Nanosicherheit befördert und damit die Sensibilisierung zu Sicherheitsfragen, Zulassungsfragen, Anmeldung des Produktes und damit Regulation vorangetrieben hat.

Weitere Instrumente, Online-Werkzeuge und Leitfäden die sowohl in EU-Projekten als auch in nationalen Projekten beispielsweise in der Schweiz und den Niederlanden entstanden sind und Unternehmen (v.a. KMU) bei der sicherheitsrelevanten Bewertung und Verortung von NM sowie bei regulatorischen Fragen helfen sollen, sind etwa: Licara Nano Scan, Stoffmanager Nano, NanoReg SbD Konzept, Ecoinvent, SUN oder der schweizerische Textilleitfaden.

⁶⁹ <https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/chemikalien/nanotechnologie/sicherer-umgang-mit-nanomaterialien/vorsorgeraster-nanomaterialien-webanwendung.html>

8.1.2 Nationale Kontaktstelle (Schweiz)

Neben der Etablierung des Vorsorgerasters wurde in der Schweiz mit der nationalen Kontaktstelle zu Nanomaterialien⁷⁰ ein weiteres unabhängiges Format geschaffen, mit welchem Unternehmen externe Expertise zu NM für sich nutzbar machen können bzw. über welches das Wissen aus dem nationalen F&E-Programm zu „Risiken und Chancen von Nanomaterialien“ (NFP64) in die Industrie zurückfließen soll. Eine der Schlussfolgerungen des NFP64 war in diesem Zusammenhang, dass zahlreiche Hürden und Unsicherheiten die Ausschöpfung des Anwendungspotenzials innovativer Nanomaterialien in der Schweiz behindern. Im Fokus der Kontaktstelle stehen deshalb Wissenstransfer, sichere Handhabe und Regulation von Nanomaterialien. Zielgruppe sind primär KMU und Start-ups (auch Spin-Offs von Universitäten), seltener auch Großunternehmen.

Die unabhängige Kontaktstelle (angesiedelt an der Empa - Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt) bündelt das nationale wissenschaftliche und regulatorische Expertenwissen zum sicheren Umgang mit synthetischen Nanomaterialien und stellt es v.a. KMU via ExpertInnen zur Verfügung. Rd. 160 ExpertInnen übernehmen die Brückenfunktion bei Anfragen und stellen ihre Expertise im Rahmen des Kontaktpunktes zur Verfügung (gratis oder auch gegen Bezahlung im Rahmen eines bilateralen Werkvertrages zwischen Unternehmen und ExpertInnen). Die Kontaktvermittlung durch die Kontaktstelle selbst ist in der Pilotphase gratis.

Die rd. 160 Schweizer ExpertInnen bilden die gesamte Wertschöpfungskette ab. Es handelt es sich dabei um ForschungsgruppenleiterInnen mit spezifischer Materialexpertise aus dem Bereich Nano Science, ToxikologInnen, AnalytikerInnen, MedizinerInnen, aber auch BeraterInnen für Materialeinordnung, Regularien, Produktdesign, Innovationsförderung und Patentfragen. An die Kontaktstelle werden mehrere Anfragen pro Woche aus dem Bereich sichere Handhabe, Regulation und Transfer von NM gerichtet. Sie bietet auch Workshops bspw. zu Verordnungen in Zusammenhang mit NM für KMU an, wo BehördenvertreterInnen, KonsulentInnen und VertreterInnen aus der Großindustrie (aus der Perspektive ihrer eigenen Erfahrung) vortragen.

Der Kontaktstelle fungiert als „Umschlagplatz“ für die Anfragen. Sie nimmt diese entgegen, hält zur Präzisierung des Anliegens darauf im Regelfall telefonisch Rücksprache mit den Anfragenden und klärt daraufhin ab, welche der relevanten ExpertInnen kurzfristig verfügbar sind. Die Anfragenden erhalten daraufhin eine Liste mit zwei bis drei Namen und können mit der Expertin oder dem Experten ihrer Wahl direkt Kontakt aufnehmen. Ab diesem Zeitpunkt

⁷⁰ www.contactpointnano.ch

ist die Kontaktstelle im Regelfall „draußen“: wie die Zusammenarbeit geregelt wird, ob gratis oder nicht, mit oder ohne NDA etc., machen die KundInnen mit den ExpertInnen bilateral aus.

Die Kontaktstelle tritt also eigentlich als „Broker“ auf, bietet selber aber keine Dienstleistungen (bspw. die Messung einer Größenverteilung) an und macht kein eigenes Consulting. Ausnahme ist die Übermittlung von allgemeinen Informationen, die öffentlich verfügbar sind, bspw. in Leitfäden oder Studien/Berichten. Zum Zweck der Evaluierung werden die Kunden nach rd. 3 Wochen um ein Feedback zum Erfolg im Sinn der zufriedenstellenden Beantwortung ihrer Anfrage gebeten. Als Erfolg wird auch verbucht, wenn die Beantwortung der Ausgangsfrage zu einer Folgefrage und zu einer erneuten ExpertInnenvermittlung durch die Kontaktstelle führt. Die Evaluierung dient der Kontaktstelle zum Qualitätsmanagement des ExpertInnennetzwerkes und zur Erstellung von relevanten Case Studies zu Schulungszwecken und zur Erstellung von Informationsmaterial. Die Kontaktstelle wird zurzeit im Wesentlichen von vier Personen betrieben und vorangebracht: Zum Team gehören ein Forscher/Toxikologe, ein TA-Experte, eine Kommunikationspezialistin und die Kontaktstellenmanagerin, die ebenfalls aus der Nanoforschung kommt. Ziel ist es, nach einer zweijährigen Pilotphase die Finanzierung sowohl öffentlich als auch über Industrie- und Gewerbeverbände sicherzustellen. Der Projektstart für die Kontaktstelle war April 2018, operativ ist sie seit Oktober 2018. Die Pilotphase endet im Frühsommer 2020.

8.2 Geförderte Forschungsprojekte

In Zusammenhang mit geförderten Forschungsprojekten wurden im Wesentlichen drei Formate identifiziert: „Sicherheitsforschung als (integraler) Bestandteil von Materialforschungsprojekten“, „Sicherheitsforschung in eigenem Forschungsprojekt (Nanosicherheitsforschung)“ sowie „Vernetzung während der Projektlaufzeit“.

8.2.1 Sicherheitsforschung als (integraler) Bestandteil von Materialforschungsprojekten

Sowohl in den Niederlanden als auch in Deutschland ist die Förderwürdigkeit von Materialforschungsprojekten zusehends auch davon abhängig, ob Sicherheits- und Risikofragen für Gesundheit und Umwelt im Rahmen des geförderten F&E Projektes gezielt adressiert und beantwortet werden.

In den Niederlanden wird bei akademischer, geförderter Forschung die Nanomaterialentwicklung in Hinblick auf gesellschaftliche Unbedenklichkeit bewertet und

somit sind auch Risikofragen ein Kriterium der Förderwürdigkeit. Wissenschaftliche Nanomaterialforschungsprojekte mussten obligatorisch sicherheitsrelevante Aspekte berücksichtigen, insbesondere wenn Doktorats-Studenten gemeinsam mit der Industrie in kollaborativen Projekten zusammenarbeiteten⁷¹. Dies bedeutet, dass neben Materialinnovatoren auch SicherheitsforscherInnen/RisikoanalytikerInnen direkt in den Projekten beteiligt sein konnten bzw. je nach erforderlicher Expertise sein mussten. Die Mitnahme von SicherheitsforscherInnen in den Niederlanden schon in frühen Phasen half dabei auch später bei einer regulatorischen Bewertung (falls das Material in einem Produkt zur Anwendung kam bzw. zugelassen werden musste). Zudem wird in den Niederlanden (NL) gegenwärtig darüber nachgedacht, Safe-by-Design (SbD) Ansätze in öffentliche Forschungsförderprogramme zu integrieren, d.h., dass Forschungsprojekte entlang eines SbD Prozesses organisiert sein sollen. v.a. im wissenschaftlichen Umfeld der Universitäten. Auch die Anwendung von SbD in Projekten der Kreislaufwirtschaft wird in den NL bereits vorangetrieben. Hier geht es v.a. darum, im Vorhinein sicherere Produkte zu entwickeln, die später auch recycelt werden können; bzw. auch darum, Alternativen zu potenziell gefährlichen Materialien zu finden, ausgehend von der gewünschten Funktionalität.

In Deutschland ist Nanotechnologie- bzw. geförderte Nanomaterialforschung ein Teil des Materialforschungsprogrammes des BMBF „Vom Material zur Innovation“. Das Programm ist der zentrale förderrechtliche Rahmen für alle Förderbekanntmachungen im Bereich Materialien. Das wichtigste Förderinstrument sind anwendungsorientierte Verbundprojekte mit einer Projektlaufzeit i.d.R. von 3 Jahren. Im Rahmen der Materialforschungsbekanntmachungen werden bei einer Förderung der Verbünde die Aspekte der Materialicherheit in Zukunft verstärkt berücksichtigt. Aspekte der Sicherheit (Toxikologie/Gesundheit aber auch in Hinblick auf Umweltschädigungen und Recyclingfähigkeit) werden daher immer mitgedacht werden müssen. Das bedeutet auch, dass Expertise aus der Sicherheitsforschung/Risikoanalyse in solchen Projekten zusehends vorhanden sein muss, insbesondere dann, wenn fachlich eine toxikologische Expertise zur Durchführung der Forschung notwendig ist.

Laut Schweizer ExpertInnen wird auch im Rahmen von EU Materialforschungsprojekten häufig verlangt, dass (im Regelfall in eigenen Arbeitspaketen) die Sicherheit und ökologische Nachhaltigkeit mitevaluiert wird. Konkret werden in solchen Arbeitspaketen die zu entwickelnden Materialien toxikologisch getestet, Ökobilanzen erstellt und weitere Methoden angewandt, um die Sicherheit, ökologische Nachhaltigkeit (inklusive Kreislaufwirtschaft) sowie die Vorteile für verschiedene Anwendungen zu evaluieren.

⁷¹ In den Niederlanden gab es ein eigenes Förderprogramm für die F&E von Nanomaterialien. Das Programm lief von 2010 bis 2016 und hatte insgesamt ein Volumen von rd. 250 Mio. Euro. Link: Nanonext.nl

Industrie und MaterialforscherInnen stellen diese Materialien im F&E Projekt zur Verfügung und profitieren im Gegenzug vom Wissen aus dieser Begleitforschung und können dieses Wissen in die weiterte Entwicklung der Materialien einfließen lassen.

8.2.2 Sicherheitsforschung in eigenem Forschungsprojekt (Nanosicherheitsforschung)

Sowohl in Deutschland, den Niederlanden und der Schweiz gab/gibt es eigene Forschungsprogramme bzw. Förderschwerpunkte, die Nanosicherheitsforschung zum Gegenstand hatten/haben. In der Schweiz wurde dazu das Nationale Forschungsprogramm "Chancen und Risiken von Nanomaterialien" aufgelegt (Ende: 2017). In den Niederlanden wurde Nanosicherheitsforschung als Teil des Nationalen Nanomaterialforschungsprogrammes „Nanonext“ adressiert (Ende: 2016). Dabei gab es auch das eigene Sub-Programm „Risk Analysis and Technology Assessment“. Zehn Prozent des Gesamtbudgets entfielen auf dieses Programm.

In Deutschland ist Nanotechnologie- bzw. Nanomaterialforschung ein Teil des Materialforschungsprogrammes des BMBF „Vom Material zur Innovation“. Nanosicherheitsforschung (NSF) wird in der aktuellen Fördermaßnahme „NanoCare 4.0“ als Schwerpunkt gefördert. Das wichtigste Förderinstrument in NanoCare 4.0 sind anwendungsorientierte Verbundprojekte mit einer Projektlaufzeit i.d.R. von 3 Jahren. Dabei werden interdisziplinär industrielle Partner und akademische/universitäre Partner zusammengebracht. Durch interorganisationale und interdisziplinäre Kooperation wird auch sichergestellt, dass die Expertise gebündelt wird. Es werden gezielt WissenschaftlerInnen und EntwicklerInnen mit verschiedenem Hintergrund gefördert (z.B. ChemikerInnen, ProzesstechnikerInnen, PhysikerInnen, ToxikologInnen, BiologInnen). In den Projekten ist es insbesondere ein *komplementärer Dialog* mehrerer ExpertiseträgerInnen untereinander, der gefördert wird. In der Begutachtung der Vorhaben für NanoCare 4.0 durch externe ExpertInnen sind auch immer ToxikologInnen involviert und bewerten, ob es im Bereich der toxikologischen Expertise Schwachstellen gibt. Eine solche toxikologische Expertise ist ein Muss für die Förderwürdigkeit in NanoCare 4.0. Das deutsche Nanosicherheitsforschungsprogramm wurde mittlerweile auch geöffnet für andere innovative Materialien, die im Verdacht stehen, umwelt- und/oder gesundheitsschädigende Wirkungen haben zu können. Konkrete Ergebnisse aus den Projekten sind das Know-how, Materialien anwendungssicher und umweltfreundlich bereits frühzeitig im Entwicklungsstadium bei jeder Materialinnovation zu gestalten, neue Verfahren, Methoden, Ansätze zur Gruppierung, mögliche Normen und Standardisierungsprotokolle o.ä., aber auch neue tangible Messsysteme.

In all diesen Programmen wurden/werden industrielle Partner und akademische/universitäre Partner (MaterialinnovatorInnen und SicherheitsforscherInnen) zusammengebracht, sei es direkt im Forschungsprojekt selbst und/oder auch im Rahmen eigener Veranstaltungen für Vernetzung und Wissenstransfer (siehe unten).

8.2.3 Vernetzung während der Projektlaufzeit

In den Niederlanden wurden im Rahmen des Nanosicherheitsforschungsprogrammes „Nanonext“ bzw. im Rahmen des Sub-Programmes „Risk Analysis and Technology Assessment“ Vernetzungsaktivitäten finanziert bzw. durchgeführt. Um den Wissensaustausch der unterschiedlichen Communities, Disziplinen und geförderten Materialforschungsprojekte zu gewährleisten, gab es Veranstaltungen, Workshops, Kurse und Vorträge, wo MaterialforscherInnen und SicherheitsforscherInnen voneinander lernen und profitieren konnten, d.h. wie man Risikoaspekte/Sicherheitsfragen in die Forschung mit einbauen kann. In den Workshops wurden auch verschiedene Projekte zusammengebracht. Die Teilnahme an diesen Veranstaltungen war für die ProjektnehmerInnen des Programmes obligatorisch. Organisiert wurden diese Netzwerkaktivitäten vom Programmträger, vom Projektkoordinator des Sub-Programmes zu Risikoforschung und TA. Dieses Programm hatte dabei immer direkten Bezug zum Materialforschungsteil des übergeordneten Förderprogrammes und war daher verschränkt und nicht isoliert davon aktiv. Dadurch sollte gewährleistet werden, dass jedes Projekt im Materialforschungsteil auch Sicherheitsfragen mitberücksichtigt und aufnimmt.

Auch im Rahmen des deutschen Materialforschungsprogrammes „Vom Material zur Innovation“ bzw. im Rahmen der Fördermaßnahme „NanoCare 4.0“ gibt es regelmäßige Statustreffen und Clustertreffen (i.d.R. einmal pro Jahr) an verschiedenen Orten wo die Fördercommunity zusammenkommt, sich austauscht und die Ergebnisse vorstellt und diskutiert. Clustertreffen finden im Rahmen des Begleitvorhabens DaNa2.0 zur BMBF-Nanosicherheitsforschung statt. Alle Projektpartner der Nanosicherheitsforschung müssen an den Clustertreffen teilnehmen (Förderbedingung) und vorwettbewerbliche Ergebnisse in der interdisziplinären Fördercommunity präsentieren. Des Weiteren wird eine Internetplattform von DaNa2.0 zur Information der Öffentlichkeit und für den Austausch von Stakeholdern zur Verfügung gestellt.

8.3 Diskussion möglicher Kooperationsformate im Kontext österreichischer F&E Förderung

Die Diskussion möglicher Kooperationsformate hat zum Ziel, einerseits die notwendigen Erfolgsfaktoren und Barrieren für eine nutzbringende Kooperation zu beschreiben, und andererseits Handlungsoptionen zur Intensivierung der Kooperation von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung im Kontext österreichischer F&E Förderung aufzuzeigen. Ergänzend dazu werden abschließende Überlegungen zu Zielgruppen und einem möglichen übergeordneten Ziel einer nutzbringenden Kooperation entlang des Lebenszyklus von Nanomaterialien angestellt.

Diese Diskussion basiert auf den Einsichten aus Kapitel 8.1 und 8.2 sowie auf einer komplementären und systematischen Reflexion zu möglichen Kooperationsformaten mit ExpertInnen aus dem Projekt.

8.3.1 Erfolgsfaktoren und Barrieren

Vertrauen und wechselseitiges Verständnis

Eine zentrale Erfolgsvoraussetzung für nutzbringende Kooperationen ist der Aufbau von Vertrauen und von wechselseitigem Verständnis zwischen den Partnern bzw. unterschiedlichen Communities. Zentral ist dabei, dass die SicherheitsforscherInnen von den MaterialinnovatorInnen als „InnovationsfördererInnen“ erkannt werden und die SicherheitsforscherInnen selbst auf die Bedarfe der InnovatorInnen eingehen und sich dabei als „BeraterInnen für den Erfolg“ verstehen, und nicht als „Kontrolleure“. Das bedeutet auch, dass diese nicht dogmatisch, sondern praktisch agieren und neben Risiken auch Chancen für die Industrie systematisch in möglichen Anwendungsfeldern aufzeigen und analysieren.

Zudem müssen auch die *finanziellen Mittel* für den nachhaltigen Aufbau dieser Vertrauensbeziehungen vorhanden sein, sei es im Rahmen einer F&E Förderung oder im Rahmen von Begleit- und Netzwerkmaßnahmen.

Unabhängigkeit und Nutzerorientierung

Unabhängigkeit ist bei delikaten Sicherheitsfragen ein wichtiger Erfolgsfaktor. Etwaige Beratungs- und Vermittlungseinrichtungen wie bspw. Kontaktstellen für die Industrie müssen daher als unabhängige Einrichtungen mit hoher Kompetenz wahrgenommen werden. Dies schafft das notwendige Vertrauen und die Anerkennung durch die Wirtschaft, auch weil KMU

nicht immer direkt mit den Behörden in Kontakt treten wollen. Weiters ist es wichtig, dass die angebotenen Unterstützungsformate den Handlungsbedarf der Industrie abdecken, anwendungsfreundlich, nutzerorientiert und niederschwellig sind (z.B. bei Online Tools und Leitfäden) bzw. als „One-Stop Shop“ für KMU ausgestaltet sind. Weiters müssen Unterstützungsangebote bzw. Umschlagplätze für Sicherheitsfragen einen messbaren/dokumentierten Mehrwert für die Wirtschaft bieten und dabei sicherere Nanoprodukt-Innovationen befördern.

Verbände und Netzwerke als Partner

Für die Diffusion und die Anerkennung von sicherheitsrelevanter Expertise, für das Vertrauen in angebotene Unterstützungsformate und deren Aufbau ist die Zusammenarbeit mit wichtigen MultiplikatorInnen aus der Wirtschaft und Wissenschaft (Unternehmensverbände, thematische Netzwerke, Akademische Partner und Business Inkubatoren) ein zentraler Erfolgsfaktor, insbesondere für erfolgreiche Kooperation auch *abseits* einer F&E Projektförderung sind starke und interdisziplinäre (persönliche) Netzwerke wichtig.

Neben Erfolgsfaktoren lassen sich auch **hemmende Faktoren** beobachten, welche einer gewinnbringenden Kooperation und einem nutzbringenden Wissenstransfer (auch in Politikeinrichtungen und Behörden) entgegenstehen können.

Mangelndes Verständnis

Es lässt sich beobachten, dass akademische SicherheitsforscherInnen auf Universitäten nicht immer jenes Verständnis und Interesse für InnovationsforscherInnen, Unternehmen und deren Bedarfe mitbringen, welches für eine gewinnbringende Kooperation wünschenswert wäre. Dies ist auch umgekehrt immer wieder der Fall, insbesondere bei nachgeschalteten Anwendern (v.a. KMU) oder auch bei F&E-/LaborleiterInnen⁷², die entweder in der Regel wenig Erfahrung mit Risikofragen in Zusammenhang mit Nanomaterialien haben und/oder nach den Standards der Laborsicherheit arbeiten und dadurch etwaigen Handlungsbedarf nicht hinreichend erkennen. Durch diesen Mangel an einem gemeinsamen, wechselseitigen Verständnis kann ein „Interdisziplinäres Mismatch“ entstehen, welches sich

⁷² Diese Beobachtung gilt weniger für die Großindustrie: Diese macht im Regelfall eigene Sicherheitsforschung und verfügen über ExpertInnen, Labors, Testsysteme und sind sehr fortschrittlich in F&E bzw. nehmen auch an kooperativer Forschung teil (vgl. Verbundprojekte NanoCare 4.0 in Deutschland). MaterialentwicklerInnen, ChemikerInnen und SicherheitsforscherInnen sowie RechtsexpertInnen arbeiten in solchen Unternehmen (bspw. BASF) unter einem Dach zusammen.

kooperationshemmend auswirkt. Dies ist jedoch suboptimal, da die Kernkompetenz bei MaterialforscherInnen nicht im Bereich Human-, und Ökotoxikologie sowie Umweltverhalten von NM liegt. Daher ist ergänzende Expertise aus der Sicherheitsforschung erforderlich, die ihrerseits aber auch nicht immer das Interesse am „Gegenüber“ aufbringt, wie es für eine enge und wechselseitige, vertrauensbasierte Zusammenarbeit erforderlich wäre.

Optimierungspotenzial bei Kooperationsanreizen für universitäre Sicherheitsforschung in der Zusammenarbeit mit Politikeinrichtungen und Regulatoren

Zudem gibt es Erfahrungen, die darauf hinweisen, dass sich die Grundlagensicherheitsforschung an Universitäten noch stärker in Beratungs- und regulative Prozesse bspw. auf OECD Ebene und bei der ECHA einbringen könnte. Dies lässt sich teilweise auch damit erklären, dass die Leistungsmessung der Universitäten (insbesondere sind das wissenschaftliche Publikationen) anderen Leistungserbringungen von Universitäten an Dritte wie etwa Beratungsdienste für die OECD oder die ECHA, in gewisser Weise entgegensteht. OECD Publikationen/Guidelines bspw. gelten für die Universitäten nicht als gleichwertiger Leistungsindikator. Daher streben WissenschaftlerInnen stärker nach Publikationen als nach Beratungsdiensten für Einrichtungen, die Politikempfehlungen abgeben. Somit kommt relevantes Wissen auch im Politikkontext nicht immer dort an, wo es nutzbringend sein könnte. Daher wäre in diesem Zusammenhang auch zu empfehlen, dass „Research to Public/for Policy“ Aktivitäten innerhalb von Universitäten aufgewertet werden. Das bedeutet auch, dass entsprechende neue/ergänzende Indikatoren für solche Aktivitäten in die Leistungsvereinbarungen mit den Universitäten aufgenommen werden sollten, wenn mehr relevanter Wissenstransfer von Universitäten in die Politik gewünscht wird.

8.3.2 Optionen der Zusammenarbeit

Vor dem Hintergrund der identifizierten Erfolgsfaktoren und Barrieren sowie den Analysen aus den drei untersuchten Ländern lassen sich folgende Optionen darlegen, entlang derer eine Zusammenarbeit zwischen Sicherheits- und Innovationsforschung erfolgversprechend im Sinne eines Mehrwertes/Nutzens für die MaterialentwicklerInnen sein kann und die weiter sondiert werden könnten, sei es in Kombination oder einzeln für sich.

Option 1: Austausch während der Laufzeit von geförderten Material F&E-Projekten

Die GutachterInnen der eingereichten F&E-Projekte definieren, dass zu bestimmten Meilensteinen im förderwürdigen Projekt externe ExpertInnen in der Rolle von BeraterInnen und (falls von Seiten der EntwicklerInnen gefordert) mit Verschwiegenheitspflicht konsultiert werden müssen. Dies sollte insbesondere dann gelten, wenn als Projektergebnis ein

Prototyp/eine Marktstudie geplant ist. Ziel sollte es dabei immer sein, dass die ExpertInnen mit ihrer Beratung die Erfolgswahrscheinlichkeit des F&E Projektes erhöhen. Voraussetzung dafür ist, dass es das ernst gemeinte und im ersten Schritt finanzierte Angebot an die EntwicklerInnen gibt, Expertise aus der Sicherheitsforschung mit tatsächlichem Mehrwert dazu zu bekommen, und zwar idealerweise so, dass die Sicherheitsforschung die Materialien für die Analyse bekommen, sie selbstständig bewerten (ggfs. mit Verpflichtung zur Verschwiegenheit nach außen) und diese Ergebnisse im Rahmen einer Beratung zurückspielen.

Auch wäre es (ergänzend) denkbar, dass F&E FördernehmerInnen von Materialentwicklungsprojekten obligatorisch an vom Fördergeber finanzierten Workshops und Vernetzungstreffen während der Projektlaufzeit teilnehmen, wo es zu einem beratungsorientierten Austausch zwischen Sicherheitsforschung und Innovationsforschung kommt, und zwar immer im Kontext der tatsächlichen Materialforschungsprojekte. Konkret könnte das Format so ausgestaltet sein, dass MaterialentwicklerInnen bei einem gewissen Meilenstein vorwettbewerbliche Zwischenergebnisse präsentieren und im Zuge dessen auch SicherheitsforscherInnen eingeladen werden, um hier beratungsorientiertes Feedback zu geben. Dabei geht es immer um Kooperation und nicht Kontrolle. Auch nicht darum, Probleme zu schaffen, wo keine vorhanden sind. Es geht um ein ernstgemeintes Angebot an die InnovatorInnen. Herausforderung zur Schaffung eines solchen Formates ist auch hier: Wie schaffe ich eine Vertrauensbasis wo tatsächlich und offen diskutiert wird und wechselseitiges Lernen von InnovatorInnen und SicherheitsforscherInnen möglich wird und nicht die Situation einer „Rechtfertigung“ entsteht? Ein offenes, informelles, interaktives Format, auch wiederkehrend und in Kooperation mit wichtigen MultiplikatorInnen kann dabei die Erfolgsaussicht erhöhen.

Option 2: Begleitforschung für geförderte Material F&E-Projekte

Im österreichischen Kontext ist es auch denkbar, dass eigenständige, sicherheitsbezogene Forschungsaktivitäten/-beratungen als Bestandteil geförderter Material F&E-Projekten ins Auge gefasst werden.

Denkbar wäre etwa, dass der Fördergeber finanzielle Mittel für auftauchende, sicherheitsrelevante Forschungsfragen im Projektverlauf reserviert (z.B. 5 % bis 10 % des Projektvolumens), welche dann im Bedarfsfall vom Projektnehmer abgerufen werden können. Voraussetzung dafür ist, dass der Projektnehmer erkennt, welche Forschungsfragen relevant sind/werden (siehe oben). Das bedeutet, dass ProjektnehmerInnen die Möglichkeit gegeben wird, relevante Fragen in externen, kleineren Forschungsberatungsprojekten von SicherheitsforscherInnen bearbeiten zu lassen, und folglich gibt es einen bilateralen

Austausch zum Ergebnis. Dabei sollte gewährleistet sein, dass diese Beratung aus Gründen der Glaubwürdigkeit unabhängig erfolgt und der/die SicherheitsforscherIn vertraulich arbeitet. Eine Ergänzung dazu wäre auch, dass sicherheitsrelevante Forschungsfragen bereits im Projektantrag aufscheinen können, aber die Bearbeitung extern zu einem späteren Zeitpunkt wie oben ausgeführt erfolgt.

Zudem könnte auch (evtl. nach entsprechenden Erfahrungen mit o.g. Formaten) sondiert werden, ob Material F&E-ProjektnehmerInnen sicherheitsrelevante Forschungsfragen nicht auch im eigenen F&E-Projekt, bspw. im Rahmen eines eigenen Arbeitspaketes, adressieren können bzw. ab einer gewissen Projektgröße und mit einer entsprechenden Marktnähe und Nutzungsperspektive auch adressieren müssen⁷³, und zwar mit einem konkreten Mehrwert für die weitere Materialentwicklung und Nutzung. Sollte diese Anforderung nicht obligatorisch formuliert sein, so könnte sie nichtsdestotrotz ein begünstigendes Förderkriterium darstellen.

Option 3: Nationale Kontaktstelle zu Nanomaterialentwicklungsfragen

Ergänzend zu den oben diskutierten Optionen bei geförderten Material F&E-Projekten wäre zu prüfen, ob eine nationale Kontaktstelle, wie sie sich bereits in der Schweiz in der Pilotphase befindet, nicht auch eine Zukunftsoption für ein Konsultationsformat bei (Nano-)Materialentwicklung und -nutzung in Österreich darstellen könnte. Die nationale Kontaktstelle in der Schweiz könnte dabei als Inspirationsquelle insbesondere für F&E Projekte und Vorhaben in der KMU Wirtschaft und abseits von F&E Förderung dienen. Dabei sollte der Innovationsaustausch im Vordergrund sein, in Form eines Beraters/einer Beraterin der/die Hinweise gibt, die marktentscheidend sein können.

Aufbau eines ExpertInnenpools

Die Kooperation von Innovationsforschung und Sicherheitsforschung entlang der Optionen 1 bis 3 erfordert den Aufbau eines ExpertInnenpools von unabhängiger Stelle und in Zusammenarbeit mit MultiplikatorInnen. Auch hier könnte die Schweiz als Vorbild dienen. In Zusammenhang mit Beratungen, Forschungsk Kooperationen bei geförderten F&E Projekten oder auch darüber hinaus wäre es bspw. denkbar, dass die FFG den Aufbau eines solchen Pools organisiert und auch die entsprechende Vermittlungstätigkeit übernimmt. Die FFG wäre somit eine Vermittlungsstelle für Fragen rund um die Chancen und Risiken von Nanomaterialien im Kontext konkreter Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (oder auch innovativer Materialien allgemein, die im Verdacht stehen gewisse Risiken zu bergen) mit

⁷³ vgl. bspw. EU Materialforschungsprojekte und auch zusehends Materialforschungsverbände in Deutschland (siehe weiter oben).

einer entsprechenden Datenbank an ExpertInnenkontakten, die ausgehend von der Frage und dem Handlungsbedarf eingebunden bzw. mit den MaterialinnovatorInnen zusammengebracht werden. Aber auch andere unabhängige Organisationen in Österreich kämen für eine solche Vermittlungstätigkeit in Frage.

8.3.3 Zielgruppen und Zielvorschlag für eine nutzbringende Kooperation entlang des Lebenszyklus von Nanomaterialien

Die Kooperation von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung kann entlang des gesamten Lebenszyklus von Nanomaterialien (NM) erfolgen: bei der Forschung im Labormaßstab, der Materialentwicklung bis hin zum Prototyp der Anwendung, der Skalierung und Herstellung, der Marktüberleitung und dann für/während der Nutzung bis hin zur Entsorgung bzw. dem Recycling. Das bedeutet auch, dass unterschiedliche Anforderungen an Sicherheit und Risikobewertung je nach Position und Verortung der entsprechenden Fragestellungen im Lebenszyklus des Nanomaterials entstehen bzw. verschiedene Zielgruppen für eine mögliche Kooperation relevant werden.

Vor diesem Hintergrund bietet sich ein mehrphasiger Aufbau der Bereitstellung von Expertise aus der Sicherheitsforschung, Risikobewertung und Umweltanalytik an; eine Bereitstellung aus Perspektive der Zielgruppe für welche diese Expertise ein Mehrwert darstellen soll, damit diese ihrer eigenen Verantwortung für sichere, umweltschonende und recycelbare Nanomaterialien zum Wohle ihrer KundInnen, der NutzerInnen und der Umwelt besser und wirtschaftlicher gerecht werden können.

So liegt es auf der Hand, dass bspw. für vorwettbewerbliche Laborforschung (bspw. auf Universitäten) in erster Linie bzw. unmittelbar Fragen des Arbeitsschutzes, Emissionsschutzes und der Entsorgung der NM sowie Safe-by-Design Ansätze im Vordergrund stehen. Durch Sensibilisierung entstehen jedoch neue Fragen zu anderen sicherheitsrelevanten Parametern, wodurch sich ein Kooperationsbedarf weiter „unten“ im Lebenszyklus ergeben kann; insbesondere, wenn es sich um kooperative Forschung mit der Wirtschaft handelt, wo eine konkrete Anwendung, ein mögliches Produkt im Fokus steht. Welches Wissen aus der Sicherheitsforschung benötigt wird, hängt damit stark von der Stelle ab, an der ich mich im Innovationszyklus als Innovator gerade befinde. Human- und Umwelttoxikologie wird vergleichsweise später relevant, wenn es um das tatsächliche Produkt und den möglichen Einsatz, d.h. um die Nutzungsphase im Markt geht. Hierbei sind sicherheitsrelevante Fragen relevant, die den Anwendungs- und Nutzungskontext betreffen und auch die Frage, wie das Material dann im konkreten Produkt eingebettet werden soll. Diese gesamthafte Betrachtung entlang des gesamten Lebenszyklus ist entscheidend für die Frage, welche Expertise wann erforderlich ist, bis hin zu Entsorgung und Recycling.

Der sicherheitsrelevante Handlungsbedarf hängt somit stets davon ab was mit dem Material passieren und in welchem Kontext es angewandt, entsorgt oder recycelt werden soll. Dieser Kontext muss von den InnovatorInnen den SicherheitsforscherInnen erläutert werden bzw. erst dann kann die Sicherheitsforschung bei diesen Fragen und der Identifikation von sicherheitsrelevantem Handlungsbedarf helfen. Für spätere Phasen im Lebenszyklus, insbesondere wenn es um Entsorgung und Recycling geht, ist auch eine bessere Kennzeichnung der Produkte erstrebenswert, damit sicherheitsrelevante Informationen nicht verloren gehen und nutzbar gemacht werden können. Ein vielversprechender Ansatz ist die Abbildung der Charakterisierungsparameter des Materials in digitalen Datenbanken, d.h. einen digitalen Zwilling entlang des Lebenszyklus zu erschaffen, um besser auch in Zusammenhang mit Entsorgung und Recycling umgehen zu können.

Sicherheitsrelevante Fragen in Zusammenhang mit Recycling und Entsorgung

Nichtsdestotrotz scheinen sicherheitsrelevante Fragen in Zusammenhang mit Recycling und Entsorgung vergleichsweise mit jenen bei Materialentwicklung und späteren Nutzung in verschiedenen Anwendungen von geringerer Komplexität und Größenordnung, was aber auch mit weniger Wissen und Bewusstsein zu solchen Fragen am Ende des Lebenszyklus zusammenhängen kann. Im Vordergrund stehen hier vergleichsweise oft funktionale Fragen, etwa ob das Recycling von NM zu einer Häufung der Nano-Additive im Recyclat führen kann und damit zu einer Grenzwertüberschreitung, oder zur Einschränkung der Funktionalität. VerfahrenstechnikerInnen haben vermutlich generell weniger Vorbehalte im Hinblick auf Expertise aus der Sicherheitsforschung, da es dabei nicht um Zulassung, Verkauf und Nutzung des Materials im Markt geht, sondern um die Qualität des Recyclats und Fragen des Arbeitsschutzes v.a. in Zusammenhang mit Stäuben und Exposition. In Hinblick auf Entsorgung geht es dann zudem um die Frage, ob NM in die Umwelt gelangen und ggfs. ob sie dann für Umwelt und Gesundheit schädlich sein können. Wenn es um Recycling und Entsorgung geht, dann wäre es also durchaus auch wünschenswert, wenn die öffentliche Hand bspw. im Rahmen von diesbezüglichen geförderten F&E-Projekten die Integration von sicherheitsrelevanter Expertise auch am Ende des Lebenszyklus gezielt ins Blickfeld rückt.

Zielvorschlag

Vor dem Hintergrund vorangegangener Reflexionen und Erfahrungen könnte für die Kooperation von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung das übergeordnete Ziel sein, *dass das Bewusstsein für Sicherheitsaspekte von Nanomaterialien (Gesundheit und Umwelt) möglichst früh in den Entwicklungsprozess einfließt und sicherheitsrelevante Expertise entlang des gesamten Lebenszyklus den InnovatorInnen zur Verfügung gestellt wird.* Dabei soll die *Herausbildung eines Innovationsökosystems im Bereich Innovativer Materialien*

(Nanomaterialien als Teil davon) im Vordergrund stehen, wo ExpertInnen aus der Sicherheitsforschung, Chancen-/Risikobewertung und Umweltanalytik vertrauensbasiert eine Rolle als BeraterInnen und InnovationsfördererInnen für MaterialinnovatorInnen einnehmen. Ein Ökosystem, in welchem die InnovatorInnen den Input aus der Sicherheitsforschung als Mehrwert sehen, wenn sie entweder die sicherheitsrelevanten Fragen selber nicht hinreichend beantworten können oder auch nicht wissen, welche Fragen überhaupt relevant werden können (je nach Zeitpunkt und Kontext im Lebenszyklus). Dabei soll die Sicherheitsforschung auch helfen Alternativen aufzuzeigen, bspw. in Hinblick auf andere Anwendungspotenziale. Auch sicherheitskritische F&E Projekte sollen förderwürdig sein, jedoch unter der Voraussetzung, dass Expertise/Beratung aus der Sicherheitsforschung projektbegleitend dabei ist.

9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

MNM in den Abfallströmen von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungen

Thermoplastische Kunststoffe (z.B. PET, PE, PP), wie sie für PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien verwendet werden, können mehrmals recycelt werden (mind. 3-5 mal). Bei richtiger „Aufstabilisierung“, d.h. Zugabe von Zusatzstoffen während des Recyclingverfahrens, können mehr Lebenszyklen erreicht werden.

Die Fachliteratur weist darauf hin, dass verschiedene MNM in PET-Flaschen und Kunststoffverpackungen eingesetzt werden können. Die EU regelt in mehreren Verordnungen, welche und teilweise in welchen Mengen nanoskalige Materialien in PET-Flaschen und Kunststoffverpackungen eingesetzt werden dürfen.

In PET-Flaschen wird beispielsweise nanoskaliges Titannitrid eingesetzt und in Verpackungsmaterialien Carbon Black. Zum Teil werden diese Nanomaterialien in Österreich in der Produktion eingesetzt, zum Teil gelangen diese durch den Import von Abfällen in die Österreichische Recyclingwirtschaft.

Kunststoffverpackungen und -flaschen müssen nicht dahingehend gekennzeichnet werden, ob sie MNM enthalten oder nicht. Inverkehrbringer und Entsorger geben normalerweise keine Angaben zu nanoskaligen Inhaltsstoffen bekannt. Die befragten ExpertInnen vermuten, dass MNM nur in wenigen Anwendungen für Kunststoffverpackungen enthalten sind, weil derzeit die Erwartungen an MNM in der Praxis nicht immer erfüllt werden können. Sie rechnen daher damit, dass Produktanwendungen mit Nanomaterialien in Österreich nur untergeordnet auftreten.

Es ist nicht bekannt, welche Nanomaterialien in welchem Ausmaß in Österreich hergestellt oder importiert werden und in die Produkterzeugung gelangen bzw. in den importierten Abfallströmen enthalten sind und dadurch in Recyclingprozessen gelangen. Im Rahmen der gegenständlichen Studie wurden beispielweise folgende Abschätzungen für Österreich gemacht: Würde bei der gesamten für das Recycling vorgesehenen Masse an PET-Flaschen (49.000 t PET, exkl. Verschlüsse und Etiketten) die maximal zulässige Menge an Titannitrid (20 mg/kg) eingesetzt, ergibt sich eine Gesamtmenge an nanoskaligem Titannitrid von ca. 985 kg, die in den Recyclingprozess gelangen könnten.

- Um untersuchen zu können, ob Nanomaterialien in den Abfallströmen von PET-Flaschen und Kunststofffolien Auswirkungen auf den Recyclingprozess haben, müsste vorab geklärt werden, ob und wenn ja, welche Nanomaterialien in Österreich tatsächlich in den genannten Abfallströmen vorkommen und in welchem Ausmaß. Zusätzlich wäre zu klären, ob es in Hinblick auf enthaltene MNM Unterschiede zwischen im Inland und im Ausland produzierten Verpackungsmaterialien gibt.
- Von Seiten der Wissenschaft und Recycler wird gewünscht, dass Hersteller mehr bzw. bessere Informationen über die Produktzusammensetzung bereitstellen und dass eine Nicht-Weitergabe von Informationen sanktioniert werden müsste.
- Meldepflichten wie in Frankreich oder Belgien erlauben Aussagen über die im Inland erzeugten oder ins Land importierten Mengen an Nanomaterialien. Ebenso ist eine Zuteilung dieser Mengen zu Branchen (NACE Codes) möglich. Eine spezifische Zuordnung zu bestimmten Produkten, wie z.B. „PET-Flaschen“ ist jedoch nicht möglich, da die Branchencodes meist eine breitere Palette an Anwendungen abdecken.

Angesichts eines weltweiten Handels bestimmter Abfallströme (etwa im Rahmen der Abfallverbringungsverordnung bzw. des Basler Abkommens) sind nationale Anstrengungen nicht ausreichend. Durch Importe von Abfällen aus Ländern außerhalb der EU, die anderen gesetzlichen Vorgaben bei der Herstellung (Zulassung, Kennzeichnung etc.) unterliegen, besteht das Risiko, dass Stoffe, die in der EU für bestimmte Anwendungen nicht zugelassen sind oder Konzentrationen aufweisen, die über allfälligen EU-Vorgaben liegen, in die heimische Recyclingwirtschaft gelangen und die Produktionsprozesse stören oder zu ungewünschtem Auftreten im Rezyklat führen können.

- Kontrollen von Abfallimporten sollen ausgeweitet werden, um Importe von Abfällen, die in ihrer Zusammensetzung nicht den EU-internen Anforderungen entsprechen, einzudämmen.
- Importeure sollten aktiv nachweisen müssen, dass die importierten Abfälle den europäischen Anforderungen entsprechen.

Auswirkungen von MNM auf den Recyclingprozess

Kunststoffe werden derzeit in erster Linie in werkstofflichen (d.h. thermisch-mechanischen) Verfahren recycelt. Es gibt kaum wissenschaftliche Studien, die das Verhalten von MNM in Kunststoffverpackungen auf den werkstofflichen Recyclingprozess und darüber hinaus untersuchen. Es gibt jedoch Hinweise, dass nanoskalige Inhaltstoffe der Kunststoffe die Recyclate farblich verändern (vergilben) können.

- Für eine wissenschaftliche Beurteilung des tatsächlichen Verhaltens und der Auswirkungen von MNM beim Recycling müsste das Verhalten von individuellen Nanomaterialien entlang der Verfahrenskette des Recyclingprozesses systematisch und mit einem entsprechenden datenbasierten und analytischen Studiendesign untersucht werden.

Laut Aussagen von VertreterInnen von Recyclingbetrieben (interviewte ExpertInnen) gibt es in den Recyclingbetrieben derzeit nur ein geringes Bewusstsein darüber, dass MNM im Abfallstrom von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungen vorkommen könnten. Sie erhalten von den Entsorgern keine Information darüber, ob und in welchem Ausmaß MNM in den Abfallfraktionen enthalten sind. Eventuelle Vorabanalysen der an die Recyclingbetriebe gelieferten Abfallfraktionen (inhouse und durch externe Labors) zielen nicht auf MNM ab.

- Um Nanomaterialien im Kunststoff gezielt nachweisen zu können, wäre es notwendig zu wissen, welche MNM konkret im spezifischen Abfallstrom vorkommen (z.B. Produktinformation, Kennzeichnung). Zusätzlich braucht es geeignete, standardisierte Messmethoden für solch komplexe Proben wie Kunststoffabfälle, die in Recyclinganlagen unkompliziert und schnell angewendet werden können.
- Sofern Materialien nanoskalige Inhaltsstoffe enthalten, die aus Sicht der Exposition relevant sind oder Recyclingprozesse negativ beeinflussen können, sollten die Möglichkeiten einer Kennzeichnung solcher Materialien überprüft und gegebenenfalls umgesetzt werden.

Grundsätzlich ist jeder Zusatzstoff, der einem Polymer zugefügt wird, ein Störstoff für die Verarbeitung und daher auch für das Recycling. Je nach geplanter Anwendung des Recyclingendprodukts können MNM während des Recyclingverfahrens aber auch als Hilfsstoffe zugesetzt werden, z.B. wenn die Kunststoffschmelze mit MNM (wie bei der Produktion von Neuware) additiviert wird, um Alterungs- und Abbauprozessen entgegenzuwirken. Im Gegensatz zu den klassischen Füllstoffen in der Kunststoffverarbeitung reichen viel geringere Mengen an Nano-Füllstoffen aus, um die gewünschten technischen Eigenschaften zu erreichen (etwa Faktor 10). Durch diese geringen Mengen wird das Grundpolymer weniger stark „verunreinigt“ und dadurch leichter verarbeitbar. Recycler nehmen derzeit keine Auswirkung von MNM auf den Recyclingprozess wahr. Verfärbungen (z.B. Gelbstichigkeit), die theoretisch auch von nanoskaligen Inhaltsstoffen hervorgerufen werden könnten, werden normalerweise auf thermische Belastung und Störstoffe (z.B. aus Polymerblends) im Kunststoff zurückgeführt.

- Es wäre daher zu untersuchen, inwiefern spezifische Nanomaterialien in PET-Flaschen und Kunststoffverpackungen Auswirkungen auf die Qualität des

Recyclingendprodukts haben, die über jene Auswirkungen der thermischen Belastung und Störstoffen hinausgehen.

Obwohl die Wahrscheinlichkeit gering ist, kann man nicht ausschließen, dass es negative Reaktionen zwischen den verschiedenen Komponenten von Kunststoffen im Recyclingprozess geben kann, unabhängig davon, ob es sich bei den Zusatzstoffen um nanoskalige Stoffe handelt oder nicht. Der Einsatz von weniger Komponenten (Anzahl und Menge) und einheitlicheren Materialien bei der Kunststoffentwicklung wäre daher für das Recycling von Vorteil.

Guidelines zum Design von recyclingfähigen Kunststoffverpackungen schreiben PET-Getränkeflaschen, die Nanopartikel enthalten, eine schlechtere Recyclingfähigkeit zu.

- Hersteller sollen nur Kunststoffsorten und Zusatzstoffe einsetzen, die die Recyclierbarkeit der Abfälle nicht gefährden.
- Entsprechende Bemühungen im Produktdesign von Kunststoffanwendungen, die Verwertbarkeit des zukünftigen Abfallstroms bereits zu berücksichtigen, sollen gefördert bzw. verbindlich eingefordert werden („Design for Recycling“).

Die großen Herausforderungen der Kunststoffrecycler liegen in anderen Bereichen als Nanomaterialien (z.B. fehlende Sortenreinheit im Abfallstrom, unzureichende Sortierung, makroskopische Anhaftungen, Abtrennung der Störstoffe, Verbundmaterialien, abbaubare Biokunststoffe). Über Verbesserungen bei Sammlung / Sortierung können indirekt auch Additive inkl. MNM besser in geschlossenen Abfallströmen gehalten werden, weil Zusatzstoffe oft produktspezifisch eingesetzt werden.

- Es wird empfohlen, die Sammel- und Sortiersysteme auszubauen, um eine sortenspezifische Sammellogistik zu etablieren.

(Nanoskalierte) Inhaltsstoffe des Kunststoffs (PET-Flaschen, Kunststoffverpackungen) können bei mechanischen Recyclingprozessen nicht herausgeholt werden. Eine Rückführbarkeit der Nanomaterialien (z.B. Nanofüllstoffe) wäre beim chemischen Recycling theoretisch denkbar, wäre aber aufgrund der Kosten und des Energiebedarfs derzeit wirtschaftlich nicht sinnvoll. Rückführbarkeit von MNM wäre für Recycler nur dann ein Thema, wenn die MNM sehr kostbar wären oder wenn dadurch die Qualität der Endprodukte verbessert würde.

Im Rahmen einer Kreislaufführung verbleiben nanoskalige Inhaltsstoffe in den produktspezifischen Anwendungen.

- Durch einen weiteren Ausbau von Kreislaufführung von Kunststoffen und bei sortenreiner Sammellogistik (Bsp. PET-Getränkeflaschen) können potenziell enthaltene produktspezifische MNM im geschlossenen Kreislauf gehalten werden und immer wieder der gleichen Anwendungsgruppe zugeführt werden.
- Forschungsaktivitäten sollten sich verstärkt darauf konzentrieren, wie Recyclingverfahren und -technologien angepasst werden könnten, damit Zusatzstoffe (inkl. MNM), die Recyclingprozesse stören oder das Recyclat nachteilig beeinflussen, mit industriellen Verfahren wieder aus der Polymerschmelze herausgeholt werden könnten.

Derzeit sehen die befragten ExpertInnen keine unmittelbare Notwendigkeit, den Recyclingprozess in Hinblick auf etwaige MNM im Abfallstrom prozess- oder verfahrenstechnisch spezifisch anzupassen. Aufgrund der stetigen Zunahme von Recyclatanteilen im Abfallstrom wird aber mit einer merkbaren Änderung in der Zusammensetzung der Abfallströme gerechnet. Mögliche Auswirkungen, auch in Hinblick auf MNM, kann man derzeit noch nicht abschätzen.

Um Recyclingquoten weiterhin einhalten bzw. verbessern zu können, ist es wichtig, dass die Werkstoffe recycelbar bleiben, zu wissen, wie sich Zusatzstoffe (z.B. Nanofüllstoffe) im System bei mehrfacher Verarbeitung auswirken, ob sichergestellt werden kann, ob das Nanomaterial gebunden bleibt und ob die Kunststoffmatrix nicht zu stark abbaut. Gerade im Bereich der Verpackung (nicht nur im Bereich der Kunststoffe) wird die Frage nach der Recyclingfähigkeit grundsätzlich an Bedeutung gewinnen.

Exposition von MNM in der Kreislaufwirtschaft

In eine Polymermatrix eingebundene Nanopartikel werden nicht oder nur in verschwindend kleinen Mengen freigesetzt werden. Die Diffusion der Partikel innerhalb der Polymermatrix ist praktisch vernachlässigbar und so können nur oberflächennahe oder beim Herstellungsprozess auf der Oberfläche abgelagerte Nanopartikel überhaupt emittiert werden. Dies gilt auch für Nanopartikel in fragmentierten (zermahlenden) und gealterten Proben, weil es sehr hohe Energien erfordert, um Materialien überhaupt bis in den Nanometer-Bereich zu zerteilen.

Für das Recycling von PET Flaschen kann daher davon ausgegangen werden, dass die Emission unter mechanischem Stress (Zerkleinern, Abrasion bei Schüttvorgängen) hauptsächlich als undifferenzierte Staubpartikel stattfinden wird. Die Staubpartikel in der Zusammensetzung entsprechen dann dem ursprünglichen Material, die Emission von einzelnen Nanopartikeln des Zusatzstoffes ist eher untergeordnet.

Es ist nicht auszuschließen, dass im Falle einer Aufbringung von MNM in Form von Coatings die Wahrscheinlichkeit einer Exposition etwas höher ausfällt als bei einer Dispergierung in der Matrix. Gänzlich ausgeschlossen kann eine Exposition gegenüber MNM im Zuge der Kreislaufführung zwar nicht, doch dürfte sie quantitativ eine untergeordnete Rolle spielen.

Vertiefende Risikoeinschätzung:

- Derzeit gibt es keine ausreichenden Hinweise, dass überhaupt ein signifikantes Problem vorliegt. Eine vertiefende Risikoeinschätzung könnte verhindern, dass trotz mangelnder Notwendigkeit unnötig viele Ressourcen in präventive oder sonstige Maßnahmen der Expositionsvermeidung gesteckt werden und dass dadurch eine verstärkte Kreislaufführung unverhältnismäßig erschwert wird.
- Inwieweit es im Zuge einer Kreislaufführung von PET-Flaschen und Kunststoffverpackungsfolien tatsächlich zu einer Freisetzung von MNM oder zu einer Anreicherung von MNM in Recyclingprodukten kommt, lässt sich letztlich nur durch gezielte Messungen eruieren. Messungen spielen somit eine wichtige Rolle im Rahmen einer vertiefenden Risikoeinschätzung.
- Bei einer vertiefenden Risikoabschätzung gilt es einige allgemeine Prinzipien zu beachten. Erstens sollte ganz besonderes Augenmerk auf jene Substanzen gelegt werden, wo es schon konkrete Hinweise auf potenzielle negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt gibt. Zweitens müssen bei der Beurteilung von Risiken sämtliche relevanten MNM separat betrachtet werden, da sich angesichts der Heterogenität dieser Stoffgruppen keine allgemeingültigen Aussagen über deren Verhalten und Gefährlichkeit treffen lassen⁷⁴. Drittens sollte überprüft werden, inwieweit dem Vorsorgeprinzip nicht bereits durch bestehende Arbeits- und Umweltschutzmaßnahmen ausreichend Genüge getan wird. Denn vieles deutet darauf hin, dass bestehende Maßnahmen insbesondere zum Schutz vor Stäuben bereits einen guten Schutz vor einer inhalativen Aufnahme von MNM bieten.
- Am dringendsten erscheint im Hinblick auf eine vertiefende Risikoeinschätzung eine nähere Untersuchung der folgenden beiden Fragen: Inwieweit erhöht die Aufbringung von MNM in Form von Coatings im Vergleich zu einer Dispergierung in der Polymermatrix die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von MNM im Zuge des Recyclings? Und kann – angesichts der laufenden Diskussion zur Frage, ob die Gefährlichkeit von Titandioxid bis dato unterschätzt wurde – eine Gefahr von Mensch und Umwelt durch eine Freisetzung von Titandioxid im Zuge des Recyclings mit ausreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden?

⁷⁴ <https://nanoinformation.at/bereiche/gesundheits/gesundheitsliche-risiken/> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Präventive und regulatorische Maßnahmen:

- Prinzipiell sind regulatorische Maßnahmen, die bei den Herstellern von Primärprodukten ansetzen, zu priorisieren gegenüber Maßnahmen, die bei der Abfall- und Recyclingwirtschaft ansetzen. Diese Priorisierung entspricht dem Prinzip, das Problem möglichst „am Ursprung“ zu adressieren. Je später eine Maßnahme im Lebenszyklus ansetzt, desto höher sind der damit verbundene Aufwand und die Kosten. Priorisiert werden sollten dementsprechend zum Beispiel Vorgaben bezüglich der Materialien, die überhaupt in Verkehr gebracht werden dürfen.
- Ein zentraler Ansatz zur Prävention etwaiger Expositionen ist ein Paradigmenwechsel in Richtung „Design for Recycling“ – dass die Kreislauffähigkeit von Produkten also bereits bei deren Design berücksichtigt wird. Dies setzt ein ambitioniertes Maßnahmenpaket bestehend aus einem Mix aus verschiedenen Anreizen und regulatorischen Vorgaben voraus.
- Auch eine verstärkte Kooperation von Sicherheits- und Innovationsforschung ist eine wichtige Maßnahme zur Prävention von Risiken. Diesbezüglich sei auf die entsprechenden Empfehlungen im entsprechenden Abschnitt weiter unten verwiesen.
- Um einer Exposition durch eigentlich in Europa verbotene Additiven bzw. MNM vorzubeugen, braucht es regulatorische Maßnahmen, um die Einhaltung europäischer Produktstandards bei Importen aus Drittstaaten zu gewährleisten bzw. zu verbessern.
- Notwendig sind auch regulatorische Vorgaben und Anreize für Hersteller, damit diese verstärkt Informationen zur Produktbeschaffenheit an Entsorger und Recycler weitergeben, sodass letztere besser mit potenziellen Expositionsrisiken umgehen können.
- Sofern Studien nachweisen, dass Expositionen bei der Behandlung nanomaterialhaltiger Abfälle auf Grund der enthaltenen Nanomaterialien umwelt- oder gesundheitsschädlich sein können und ein potenzielles nicht akzeptables Risiko für Mensch und Umwelt darstellen, sollen entsprechende nanospezifische Regelungen mit in die gesetzlichen Regelwerke aufgenommen oder eine Inverkehrsetzung beschränkt werden.
- Grundsätzlich ist zu bedenken, dass MNM bei weitem nicht die einzigen potenziellen Hindernisse für die Kreislaufführung von Rohstoffen – insbesondere von Kunststoffen – sind. Der Anteil der Ressourcen, die in eine Prävention etwaiger Risiken von MNM im Zuge der Kreislaufwirtschaft gesteckt werden, sollte daher in einem adäquaten Verhältnis stehen zu jenen Mitteln, die in den Abbau sonstiger Hürden für die Kreislaufwirtschaft investiert werden.

Analyse- und Prüfmethode für das Recycling von MNM

Standardisierte Methoden zur Identifizierung und Quantifizierung der ausgewählten MNM in Kunststoffmatrices wie PET oder PE existieren derzeit nicht. In der Literatur sind jedoch Methoden beschrieben, die sich auf das Problemfeld anwenden oder dafür adaptieren lassen. Die Identifizierung/Quantifizierung stellt sich für die anorganischen, nicht-kohlenstoffbasierten MNM in der Polymermatrix (Produkt, Recyclat) und den Migrationssimulantien am einfachsten dar. Mit derzeitigen Methoden ist eine eindeutige Identifizierung der meisten MNM im Wasser- und Luftpfad erschwert oder nicht möglich. Ursache ist die mögliche Anwesenheit gleichartiger Partikel aus anderen, auch natürlichen Quellen. Hier ist eine fallspezifische Betrachtung notwendig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Die meisten MNM können als Partikel in den Kunststoffen PET oder PE/PP nachgewiesen werden, wenn sie in ausreichender Menge beigemischt wurden (ca. > 10 ppm).
- Für mineralische/anorganische MNM kann eine Röntgenfluoreszenzanalytik (XRF) die generelle Anwesenheit von Elementen in der Kunststoffmatrix, aus denen die MNM zusammengesetzt sind, leisten. Diese ist jedoch nicht spezifisch für Partikel. XRF Spektrometer sind als mobile Geräte erhältlich.
- Alternativ ist ein Aufschluss der Matrix und Bestimmung mit Spurenelementanalytik möglich; das ist ebenfalls nicht spezifisch für Partikel.
- Nachfolgend kann für die meisten mineralischen MNM eine Röntgendiffraktometrie (XRD) oder Infrarotspektrometrie (FT-IR) eingesetzt werden.
- Kohlenstoffbasierte MNM wie Carbon Black oder CNTs können mit differentieller Thermogravimetrie bestimmt werden.
- Für die Analytik in Simulantien aus Migrationstests (Kunststoffverpackungsfolien) kann für mineralische, anorganische MNM die partikel-spezifische Einzelpartikel-ICPMS eingesetzt werden.
- Hierbei ist lediglich der Arbeitsbereich der Methode zu berücksichtigen. Je nach Art des MNM können Partikel unter einer bestimmten Größe nicht mehr detektiert werden (SiO_2 (~100 nm) > TiO_2 (~50 nm) > Tone (~30 nm) > Ag (~20 nm)).
- Für die Analytik kohlenstoffbasierter MNM kommt eine Filtration und Bestimmung der auf dem Filter zurückgehaltenen MNM in Frage.
- Für die Analytik in Simulantien aus Migrationstests (Kunststoffverpackungsfolien) kann für mineralische, anorganische MNM die partikel-spezifische Einzelpartikel-ICPMS eingesetzt werden.

- Hierbei ist lediglich der Arbeitsbereich der Methode zu berücksichtigen. Je nach Art des MNM können Partikel unter einer bestimmten Größe nicht mehr detektiert werden (SiO_2 (~100 nm) > TiO_2 (~50 nm) > Tone (~30 nm) > Ag (~20 nm))
- Für die Analytik kohlenstoffbasierter MNM kommt eine Filtration und Bestimmung der auf dem Filter zurückgehaltenen MNM in Frage
- In Abluft, Umgebungsluft, Spül- und Abwasser ist die Bestimmung von freigesetzten MNM erschwert.
- Es muss davon ausgegangen werden, dass die meisten MNM im Aerosol/Schwebstoff noch in die Kunststoffmatrix eingebunden sind.
- Die Konzentration freier MNM wird als sehr niedrig angenommen.
- Für fast alle berücksichtigten MNM existieren ähnlich zusammengesetzte natürliche oder nicht-intentionell anfallende Nanopartikel von denen die MNM nur mit aufwändigen Verfahren (Elektronenmikroskopie, Multi-Element Einzelpartikel-ICPMS) unterschieden werden können.
- Da der Anteil an freien MNM als sehr gering einzuschätzen ist, kommt dieser Analytik kein hoher Stellenwert zu.

Als Handlungsempfehlungen ergeben sich:

- Ein Analysenplan sollte für den realen Betrieb unter Berücksichtigung der Erfordernisse des Betreibers im Hinblick auf ArbeitnehmerInnenschutz, Prozessabläufe und Bedürfnisse bezüglich der Recyclat-Reinheit erarbeitet werden.
- Die hier vorgeschlagene Methodik sollte im realen Betrieb angewendet werden und das am besten geeigneten Verfahren sollte bestimmt werden.
- Die Verfahren sollten vorab an Proben bekannter Zusammensetzung (Zuschlagstoffe, Additive, Konzentrationen) getestet werden.
- Eine weitere Entwicklung von Methoden ist erforderlich. Diese Methoden sollten in der Lage sein, Partikel nach ihrem Ursprung zu unterscheiden.
- Es ist zu untersuchen, an welchem Punkt des Recyclingverfahrens MNM-spezifische Methoden benötigt werden und wie der Kostenaufwand (Investition in Analysengeräte, Methodenentwicklung) minimiert werden kann (Kosten-Nutzen Analyse).

Rechtliche Rahmenbedingungen

In Hinblick auf Nanomaterialien existieren durch die REACH Novelle sowie die Verordnung betreffend Lebensmittelkontaktmaterialien aus Kunststoff zulassungsseitig spezifische Regelungen.

In der Österreichischen Gesetzgebung finden sich für die betrachteten Abfallströme keine direkten Regelungen betreffend Nanomaterialien. Um den ArbeitnehmerInnenschutz sicherzustellen, gibt es im Wesentlichen drei Regelungen, wobei jedoch keine Regelungen spezifische Bestimmungen für den Umgang mit Nanomaterialien stellen. Mit Ausnahme von Lebensmittel und Kosmetika, gibt es derzeit keine gesetzlich vorgesehene Kennzeichnung von Nanomaterialien in Produkten.

- Sortiertechniken oder Kennzeichnung (Farbe, Symbol, etc.) können es erlauben, kostengünstig und effizient Teilströme, die das Recycling auf Grund ihrer Zusammensetzung negativ beeinflussen können, aus dem Abfallstrom abzutrennen. In Hinblick auf die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft soll jedoch die Gesetzgebung verstärkt Fokus darauf legen, dass nur Materialien eingesetzt werden, die möglichst hochwertige Recyclingprozesse weder kurz- noch langfristig gefährden und eine Ausschleusung von für das Recycling ungeeigneten Abfällen durch Sortierung hinfällig wird.
- Inverkehrsetzer von PET-Flaschen oder Kunststoffverpackungen sollen angehalten werden, dass sie für ihre Produkte bescheinigen, dass diese den Recyclingprozessen, die dem Stand der Technik entsprechen, problemlos zugeführt werden können. Dies würde auch bedeuten, dass Inverkehrsetzer die genaue Zusammensetzung ihrer Produkte kennen oder eine entsprechende Bescheinigung durch Zulieferer (z.B. Additivhersteller) vorweisen können.
- Auf Basis der vertieft betrachteten Abfallströme „PET-Flaschen“ und „Verpackungsfolien“ kann für allfällige Novellierungen der österreichischen Abfallgesetzgebung kein Handlungsbedarf abgeleitet werden.

Potenziale und Perspektiven für nutzbringende Kooperation von Sicherheitsforschung und Innovationsforschung in Zusammenhang mit MNM und AM

TeilnehmerInnen des Stakeholder-Workshops befürworteten eine Verbesserung des Know-how-Transfers zwischen Innovationsforschung und Sicherheitsforschung, unabhängig von MNM. Grundsätzlich sind aus Sicht der befragten ExpertInnen alle Maßnahmen, die den Austausch zwischen Sicherheits- und Innovationsforschung verbessern, begrüßenswert – von der Einrichtung einer Nationalen Kontaktstelle über Vorträge, Workshops und Datenbanken/ExpertInnenpools bis hin zu geförderten Forschungs- und Beratungsprojekten.

Um die Kooperation von Sicherheits- und Innovationsforschung zu verbessern, werden folgende konkrete Optionen (entweder einzeln oder in Kombination umgesetzt) vorgeschlagen:

- **Austausch während der Laufzeit von geförderten Material F&E-Projekten:** Die GutachterInnen von eingereichten F&E-Projekte definieren, dass zu bestimmten Meilensteinen im förderwürdigen Projekt externe ExpertInnen in der Rolle von BeraterInnen und (falls von Seiten der EntwicklerInnen gefordert) mit Verschwiegenheitspflicht konsultiert werden müssen. Dies sollte insbesondere dann gelten, wenn als Projektergebnis ein Prototyp/eine Marktstudie geplant ist. Ziel sollte dabei sein, dass die ExpertInnen mit ihrer Beratung die Erfolgswahrscheinlichkeit des F&E Projektes erhöhen. Auch wäre es denkbar, dass F&E FördernehmerInnen von Materialentwicklungsprojekten obligatorisch an vom Fördergeber finanzierten Workshops und Vernetzungstreffen während der Projektlaufzeit teilnehmen, in denen es im Kontext der tatsächlichen Materialforschungsprojekte zu einem beratungsorientierten Austausch zwischen Sicherheitsforschung und Innovationsforschung kommt.
- **Begleitforschung für geförderte Material F&E-Projekte:** Es ist auch denkbar, dass eigenständige, sicherheitsbezogene Forschungsaktivitäten/-beratungen Bestandteil geförderter Material F&E-Projekte werden. Der Fördergeber könnte finanzielle Mittel für auftauchende, sicherheitsrelevante Forschungsfragen im Projektverlauf reservieren (z.B. 5 % bis 10 % des Projektvolumens), welche dann im Bedarfsfall vom Projektnehmer abgerufen werden können. Damit wird ProjektnehmerInnen die Möglichkeit gegeben, relevante Fragen in externen, kleineren Forschungsberatungsprojekten von SicherheitsforscherInnen bearbeiten zu lassen, und folglich gibt es einen bilateralen Austausch zum Ergebnis. Sicherheitsrelevante Forschungsfragen könnten auch bereits im Projektantrag aufscheinen, die Bearbeitung würde aber erst extern zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Es könnte auch sondiert werden, ob Material F&E-ProjektnehmerInnen sicherheitsrelevante Forschungsfragen nicht auch im eigenen F&E-Projekt, bspw. im Rahmen eines eigenen Arbeitspaketes, adressieren können bzw. ab einer gewissen Projektgröße und mit einer entsprechenden Marktnähe und Nutzungsperspektive auch adressieren müssen. Sollte diese Anforderung nicht obligatorisch sein, so könnte sie ein begünstigendes Förderkriterium darstellen.
- **Nationale Kontaktstelle zu Nanomaterialentwicklungsfragen:** Es wäre zu prüfen, ob eine nationale Kontaktstelle, wie sie sich bereits in der Schweiz in der Pilotphase befindet, nicht auch eine Zukunftsoption für ein Konsultationsformat bei (Nano-)Materialentwicklung und -nutzung in Österreich darstellen könnte. Die nationale Kontaktstelle in der Schweiz könnte dabei als Inspirationsquelle insbesondere für F&E Projekte und Vorhaben in der KMU Wirtschaft und abseits von F&E Förderung dienen. Dabei sollte der Innovationsaustausch in Form eines Beraters/einer Beraterin im Vordergrund stehen, der/die Hinweise gibt, die marktentscheidend sein können.

- **Aufbau eines ExpertInnenpools:** Die Kooperation von Innovationsforschung und Sicherheitsforschung entlang der vorgeschlagenen Optionen erfordert den Aufbau eines ExpertInnenpools von unabhängiger Stelle und in Zusammenarbeit mit MultiplikatorInnen. Auch hier könnte die Schweiz als Vorbild dienen. In Zusammenhang mit Beratungen, Forschungsk Kooperationen bei geförderten F&E Projekten oder auch darüber hinaus wäre es bspw. denkbar, dass die FFG den Aufbau eines solchen Pools organisiert und auch die entsprechende Vermittlungstätigkeit übernimmt. Die FFG wäre somit eine Vermittlungsstelle für Fragen rund um die Chancen und Risiken von Nanomaterialien im Kontext konkreter Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (oder auch innovativer Materialien allgemein, die im Verdacht stehen gewisse Risiken zu bergen) mit einer entsprechenden Datenbank an ExpertInnenkontakten, die ausgehend von der Frage und dem Handlungsbedarf eingebunden bzw. mit den MaterialinnovatorInnen zusammengebracht werden. Aber auch andere unabhängige Organisationen in Österreich kämen für eine solche Vermittlungstätigkeit in Frage.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwertung von Kunststoffverpackungen im Jahr 2013 in t	38
Tabelle 2: Kunststoffsorten und -klassen für Folien und Getränkeflaschen (nach Abts 2014 und Martens & Goldmann 2016))	49
Tabelle 3: Schritte in einer generalisierten Ressourcenkaskade für Nanokompositen aus Nanopartikeln und Polymeren (Reijnders 2014)	79
Tabelle 4: Zuordnung der verschiedenen Emissionspotenziale hinsichtlich potenzieller gesundheitlicher bzw. umweltgefährdender Auswirkungen	91
Tabelle 5: Vorschläge für die analytische Methodik für das jeweilige MNM und die berücksichtigte Matrix	120
Tabelle 6: Löslichkeiten und daraus resultierende Freisetzungsort für die berücksichtigten MNM	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufkommen Verpackungsabfall aus Kunststoffen 2011-2016	37
Abbildung 2: Aufkommen an Kunststoffverpackungsabfällen im Jahr 2013. Quelle: van Eygen et al. (2018)	37
Abbildung 3: Verfahrenswege der Kunststoffverwertung (Quelle: Martens & Goldmann 2016)	54
Abbildung 4: Theoretische Expositionspotenziale bei Kreislaufführung von PET-Flaschen (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf nanoinformation.at, Struwe et al. 2012, varioform.at)	97
Abbildung 5: Theoretische Expositionspotenziale bei Kreislaufführung von Kunststoff-Verpackungsfolien (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf nanoinformation.at, Struwe et al. 2012)	98

Literaturverzeichnis

Abts, G. (2014): Kunststoff-Wissen für Einsteiger. 2. Auflage. Hanser.

Alzuhairi, M., Khalil, B., Hadi, R. (2017): Nano ZnO Catalyst for Chemical Recycling of Polyethylene terephthalate (PET). Eng. Technol. J. 35 (8), 831-837. ISSN1681-6900.

Arndt, T., Schramm, S., Fiedler, M., Lutsch, B. (2017): Herstellung von Nanocompositen aus Cellulose und präzipitierten CaCO_3 Zur Festigkeitssteigerung In Papier (Pcc-Cellulose-Nanocomposite. PTS-Forschungsbericht 16/16.

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, zitiert in UBA 2018.

Baran, P., Quicker, P. (2017): Verbleib und Verhalten von Nanopartikeln bei der Abfallverbrennung. Österr Wasser- und Abfallw 69: 51.

Bertling, J., Borelbach, P., Hiebel, M., Kabasci, S., Kopitzky, R. (2018): Recycling von Biokunststoffen – UMSICHT nimmt Stellung, UMSICHT Positionspapiere, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Oberhausen.

BG BAU - Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (2018): Nanoteilchen in Bau- und Reinigungsprodukten. http://nano.dguv.de/fileadmin/user_upload/documents/textfiles/BGBAU/Nanoliste28.09.2017.pdf.

BGVZ (2019) Bund Getränkeverpackungen der Zukunft; Preis –Leistungs-Verhältnis Gewichtsreduktion BGVZ.

BMNT Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2017): Bundesabfallwirtschaftsplan 2017.

BMNT Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich Statusbericht 2019.

Böttcher, H. (2001): Funktionelle Beschichtungen auf Basis anorganischer Nanosole. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Materials Science and Engineering Technology, 32(10), 759-766.

Bünemann, A., Christiani, J., Kerkhoff, M., Koch, S. (2016): Folgenabschätzung einer Ausweitung der Pfandpflicht für Saft-Einwegverpackungen auf das PET-Recycling.

Bumbudsanpharoke, N., Choi, J., Ko, S. (2015): Applications of Nanomaterials in Food Packaging *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* Vol. 15, 6357–6372, 2015.

BUND (2015): Nanomaterialien in Lebensmitteln

https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/nanotechnologie_nano_in_lebensmitteln_faltblatt.pdf.

Caballero-Guzman, A., Sun, T., Nowack, B. (2015): Flows of engineered nanomaterials through the recycling process in Switzerland. *Waste Management* 36 (2015) 33–43.

Caro, C.J. (2007): Mechanisch verstärktes thermoplastisches Kunststoffzeugnis für laserbasierte Fügeverfahren; <http://www.patent-de.com/20081224/DE102007029239A1.html>, [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019].

Chaqmaqchee, F.A.I., Baker, A.G., Salih, N.F. (2017): Comparison of Various Plastics Wastes Using X-ray Fluorescence. *American Journal of Materials Synthesis and Processing*, 5(2): p. 24-27.

Cho, H.J., Myung, S.W. (2011): Determination of Cadmium, Chromium and Lead in Polymers by ICP-OES Using a High Pressure Asher (HPA). *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 32(2): p. 489-497.

Deering, C.E., et al. (2008): A novel method to detect unlabeled inorganic nanoparticles and submicron particles in tissue by sedimentation field-flow fractionation. *Particle and Fibre Toxicology*, 5.

DGUV – Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. (2018): Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft; <http://nano.dguv.de/grundlagen/effekte/>.

DGUV Forum (2018): Die Nano-Liste der BG BAU; Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV Forum 5/13.

Donovan, A.R., et al. (2016): Single particle ICP-MS characterization of titanium dioxide, silver, and gold nanoparticles during drinking water treatment. *Chemosphere*, 144: p. 148-153.

Eberle, U. (2010): TA SWISS-Studie: NANOTECHNOLOGIE im Bereich der Lebensmittel; Vortrag im Rahmen der Tagung: Regulierung von Nano-materialien - Verantwortlicher Umgang mit verbrauchernahen Produkten; Wien 18.2.2010
https://www.bmgf.gv.at/cms/home/attachments/3/4/7/CH1180/CMS1267090819397/ta-swiss-studie_nanotechnologie_im_lebensmittelbereich.pdf.

Echegoyen, Y., Rodriguez, S., Nerin, C. (2016): Nanoclay migration from food packaging materials. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 33(3): p. 530-539.

Eckardt, R., Krupicka, E., Hofmeister, W. (2012): Validation of Powder X-Ray Diffraction Following EN ISO/IEC 17025. *Journal of Forensic Sciences*, 57(3): p. 722-737.

Ecologique-solidaire (2017): Ministere de la Transition ecologique et solidaire; Elements issus des declarations des substances a l'etat nanoparticulaire; Rapport d'etude 2017.

EFSA Journal European Food Safety Authority (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.]. zitiert in UBA 2018.

EFSA Journal European Food Safety Authority (2013): Scientific Opinion on the safety assessment of the process "4PET" used to recycle post-consumer PET into food contact materials. EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes, Flavourings and Processing Aids (CEF). EFSA Journal 2013;11(10):3399.

EFSA Journal European Food Safety Authority (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.]. zitiert in UBA 2018.

EFSA Journal European Food Safety Authority (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 zitiert in UBA 2018.

EFSA Journal European Food Safety Authority (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 zitiert in UBA 2018.

EFSA Journal European Food Safety Authority (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 zitiert in UBA 2018.

EPBP European PET Bottle Platform (2019): How to keep a sustainable PET recycling industry in Europe; <https://www.epbp.org/> [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019].

Erhard, K.; Fiedler, M.; Kretzschmar, J.: (2012): Senkung der Kosten gefüllter Papiersorten durch die Einlagerung von Faser-Füllstoff-Compounds auf Basis nanoskaliger Cellulosen. Pts-Forschungsbericht IGF 16359.

European Commission (2012): Types and uses of nanomaterials, including safety aspects; Commission Staff Working paper.

Fehringer, R. (2019): Ökobilanz von Frischmilchverpackungen; Roundtable Getränkekarton 24. Juni 2019; http://www.getraenkekarton.at/wp-content/uploads/2019/07/LCA_Milchverpackungen_c7-consult1.pdf, [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019].

FH Campus Wien (2019): Die Circular Packaging Design Guideline. Empfehlungen für die Gestaltung recyclinggerechter Verpackungen. Version 01, 2019.

Fiamegos, Y., Guntinas, M.B.D. (2018): Validation strategy for an ED-XRF method to determine trace elements in a wide range of organic and inorganic matrices based on fulfilment of performance criteria. Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy, 150: p. 59-66.

Fitch, B.R., Buntel, C.J., Wang, Y., J, m Hau, S.K., Londergan, T.M. (2014): The Recycling Exchange and Nanotechnology. : Towards a Zero Waste Economy. In: Misra, A., Bellare, J.R. (Hg.): Nanoscience and technology for mankind, The National Academy of Science. India. S. 148-159.

FOD (2017): Federale overheidsdienst; Volksgezondheid, veiligheid van de Voedselketen en leefmilieu: L'enregistrement des substances manufacturées à l'état nanoparticulaire; RAPPORT ANNUEL Année de commerce 2016.

Frischenschlager, H., Reinberg, V., Kissler, J. (2018): Roadmap 2050 Biobasierter Kunststoffe – Kunststoff aus nachwachsenden Rohstoffen. Nachhaltig Wirtschaften. Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 06/2018, BMVIT.

Garbarino, J.R., Struzeski, T.M. (1998): Geological Survey (U.S.), Methods of analysis by the U.S. Geological Survey National Water Quality Laboratory : determination of elements in whole-water digests using inductively coupled plasma-optical emission spectrometry and inductively coupled plasma-mass spectrometry. Open-file report / U S Geological Survey. Denver, Colo.: Dept. of the Interior U.S. Geological Survey, Information Services distributor. xii, 101 p.

Gohler, D., et al. (2010): Characterization of Nanoparticle Release from Surface Coatings by the Simulation of a Sanding Process. *Annals of Occupational Hygiene*, 54(6): p. 615-624.

Gohler, D., et al. (2012): Nanoparticle release from nanocomposites due to mechanical treatment at two stages of the life-cycle. *Nanosafe 2012: International Conferences on Safe Production and Use of Nanomaterials*, 2013. 429.

Gondikas, A., et al. (2018): Where is the nano? Analytical approaches for the detection and quantification of TiO₂ engineered nanoparticles in surface waters. *Environmental Science-Nano*, 5(2): p. 313-326.

Goodlaxson, B., Curtzwiler, G., Vorst, K. (2018): Evaluation of methods for determining heavy metal content in polyethylene terephthalate food packaging. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 34(2): p. 119-139.

Holder, A., Vejerano, E., Zhou, X., Marr, L. (2013): Nanomaterial disposal by incineration. *Environ. Sci.: Processes Impacts* 15, 1652.

Horodytska, O., Valdés, F.J., Fullana, A. (2018): Plastic flexible films waste management – A state of art review. *Waste Management* 77, 413–425.

International Council on Clean Transportation (ICCT) (2012): Influence of rolling resistance in CO₂; Series: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP), Working Paper 2012-6, ICCT, Washington DC.

Jopp, K. (2006): *Nanotechnologie – Aufbruch ins Reich der Zwerge*; 2. Überarbeitete Auflage.

Kaiser, W. (2016): *Kunststoffchemie für Ingenieure. Von der Synthese bis zur Anwendung*. 4. Auflage, Hanser.

KHS (2019): <https://www.khs.com/produkte/detail/barrieretechnologie-innopet-plasmax/>; abgerufen 3.9.2019.

Kleebauer, M. (2015): New barrier layers based on cellulose nano – Colloids.

Kranert, M. (Hrsg.) (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. 5. Auflage. Springer Vieweg.

Linsinger, T.P.J., et al. (2013): Validation of methods for the detection and quantification of engineered nanoparticles in food. *Food Chemistry*, 138(2-3): p. 1959-1966.

Luther, W. (2008): Einsatz von Nanotechnologien in Architektur und Bauwesen. HA Hessen-Agentur. <https://www.technologieland-hessen.de/publikationen?catid=218>.

Loosli, F., et al. (2019): Sewage spills are a major source of titanium dioxide engineered (nano)-particle release into the environment. *Environmental Science-Nano*, 6(3): p. 763-777.

López-Fonseca, R., Duque-Ingunza, I., de Rivas, B., Arnaiz, S., Gutiérrez-Ortiz, J.I. (2010): Chemical recycling of post-consumer PET wastes by glycolysis in the presence of metal salts. *Polym. Degrad. Stab.* 95 (6), 1022–1028.

Martens, H., Goldmann, D. (2016) *Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis*. 2. Auflage. Springer Vieweg.

Mehnert, R., Hartmann, E., Gläsel, H. J., Rummel, S., Bauer, F., Sobottka, A., & Elsner, C. (2001): Funktionelle Schichten durch UV- und Elektronenstrahlhärtung. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Materials Science and Engineering Technology*, 32(10), 774-780.

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.

Mozhayeva, D., Engelhard, C. (2019): A critical review of single particle inductively coupled plasma mass spectrometry – A step towards an ideal method for nanomaterial characterization. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, X(X): p. XX-XX (advance article).

Navratilova, J., et al. (2015): Detection of Engineered Copper Nanoparticles in Soil Using Single Particle ICP-MS. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(12): p. 15756-15768.

Neubauer, N., et al. (2017): Nanoscale Coloristic Pigments: Upper Limits on Releases from Pigmented Plastic during Environmental Aging, In Food Contact, and by Leaching. *Environmental Science & Technology*, 51(20): p. 11669-11680.

Neumann, J., Kudryavtseva, T., Krautner, C., Zißlsberger, C. (2017): Anwendungen von Nanofasern bei der Filtration in Fahrzeugen; zitiert in Reihlen, A., Zimmermann, T. Jepsen D. (2017).

OECD (2014): Nanotechnology and Tyres: Greening Industry and Transport, OECD Publishing. https://read.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/nanotechnology-and-tyres_9789264209152-en.htm.

Ökopol (2010): Abschlussbericht der Themengruppe 2 der Nanokommission. Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten. 2. Dialogphase 2009 – 2010.

https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj82fqT7fvkAhXxsosKHUWDAQUQFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.bmu.de%2Ffileadmin%2FDaten_BMU%2FDownload_PDF%2FNanotechnologie%2Fnanodialog_2_Tg1_bf.pdf&usg=AOvVaw0h6rzf7KmUxQUpRol8V4Mk.

Pallares, S., Gomez, E.T., Jordan, M.M. (2019): Typological Characterisation of Mineral and Combustion Airborne Particles Indoors in Primary Schools. *Atmosphere*, 10(4).

Pang, L.S.K., Saxby, J.D., Chatfield, S.P. (1993): Thermogravimetric Analysis of Carbon Nanotubes and Nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry*, 97(27): p. 6941-6942.

Part, F., Greßler, S., Huber-Humer, M., Gázsó A. (2015a) Umweltrelevante Aspekte von Nanomaterialien am Ende der Nutzungsphase – Teil II: Abfallverwertung und -entsorgung. Nano trust dossier, Nr. 44 April 2015.

Part, F., Zecha, G., Causon, T., Sinner, E., Huber-Humer, M. (2015b): Current limitations and challenges in nanowaste detection, characterisation and monitoring. *Waste Management* 43 (2015) 407–420.

PET-Recycling Schweiz (2015): Stellungnahme zu Nanomaterialien https://www.petrecycling.ch/tl_files/content/PDF/Wissen/Fremdstoffe/PET-Recycling%20Schweiz%20-%20Nanotechnologien%20-%20D.pdf, [Zuletzt abgerufen am 16.10.2019]

Peters F. (2012): Tires and nano materials; Tire Industry Project⁷⁵

⁷⁵ The Tyre Industry Project was launched in 2006 and organized as a sector project at the World Business Council on Sustainable Development.

Plastverarbeiter (2002): Wachstumsmarkt PET; https://www.plastverarbeiter.de/wp-content/uploads/migrated/docs/666_28598.pdf.

Praetorius, A., et al. (2017): Single-particle multi-element fingerprinting (spMEF) using inductively-coupled plasma time-of-flight mass spectrometry (ICP-TOFMS) to identify engineered nanoparticles against the elevated natural background in soils. *Environmental Science-Nano*, 4(2): p. 307-314.

Rahimzei, E., Sann, K., Vogel, M. (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien, Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen.

Raynor, O.C. , Cebula, J.I. , Spangenberg, J.S. , Olson, B.A. , Dasch, J.M. and D'Arcy , J.B. (2012): Assessing potential nanoparticle release during nanocomposite shredding using direct- reading instruments , *J Occup Environ Health* , 9 , 1 – 13.

Reijnders, L. (2014): Safe recycling of materials containing persistent inorganic and carbon nanoparticles. In: Njuguna, J., Pielichowski, K., Zhu, H. (Hg.): *Health and Environmental Safety of Nanomaterials. Polymer Nanocomposites and Other Materials Containing Nanoparticles*. Woodhead Publishing Limited.1. Aufl. S. 222-250.

Ritz, M., Vaculikova, L., Plevova, E. (2010): Identification of Clay Minerals by Infrared Spectroscopy and Discriminant Analysis. *Applied Spectroscopy*, 64(12): p. 1379-1387.

Sánchez, C., Hortal, M., Aliaga, C., Devis, A., Cloquell-Ballester, V.A. (2014): Recyclability assessment of nano-reinforced plastic packaging; *Waste management* 34, 2647-2655.

SCENIHR (2013): Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks – SCENIHR; Nanosilber: Sicherheit, Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt und die Rolle bei der Entstehung von Bakterienresistenzen; Vorläufige Stellungnahme.

Seitz, S., Moller, B.P., Thielmann, A., Sauer, A., Meister, M., Pero, M., Kleine, O., Rohde, C., Bierwisch, A., de Vries, M., Kayser, V. (2013): Nanotechnology in the sectors of solar energy and energy storage. Technology Report by the International Electrotechnical Commission (IEC).

Som, C., Nowack, B., Wick, P., Krug, H. (2010): Nanomaterialien in Textilien: Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheits-Aspekte Fokus: synthetische Nanopartikel. www.empa.ch/nanosafetextiles.

Sørensen, M. A., Ingerslev, F., Bom, K., Lassen, C., Christensen, F., Warming, M. (2014): Survey of products with nanosized pigments-Focusing on products exempt from the Danish Nanoproduct Register. Environmental project, (1638).

Steward, F., Tsoi, J. C., Coles, A. M. (2008): Innovation and sustainability in print-on-paper: a comparison of nanoparticle and deinking niches as emergent sociotechnical networks. *Journal of cleaner production*, 16, 957-966.

Störmer, A., Bott, J., Kemmer, D., Franz, R. (2017): Critical review of the migration potential of nanoparticles in food contact plastics; *Trends in Food Science & Technology* 63 (2017) 39-50.

Struwe, J., Schindler, E., Pfirrmann, O., Kost, E. (2012): Bedeutung von Nanomaterialien beim Recycling von Abfällen; Arbeitspapier 270, Hans Böckler Stiftung.

Taboada-Lopez, M.V., et al. (2019): Enzymatic hydrolysis as a sample pre-treatment for titanium dioxide nanoparticles assessment in surimi (crab sticks) by single particle ICP-MS. *Talanta*, 195: p. 23-32.

Taylor, H.E. (2001): Inductively coupled plasma-mass spectrometry : practices and techniques. San Diego: Academic Press. xi, 294 p.

Tharaud, M., et al. (2017): TiO₂ nanomaterial detection in calcium rich matrices by splCPMS. A matter of resolution and treatment. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 32(7): p. 1400-1411.

Touati, N., Kaci, M., Bruzard, S., Grohens, Y. (2011): The effects of reprocessing cycles on the structure and properties of isotactic polypropylene/cloisite 15A nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 96, 1064-1073.

Tyagi, S; Tyagi, R; Thapliyal, BP; Mathur, RM; Ray, A (2011): Surface and aging characteristics of paper coated with nano size zinc oxide pigment; zitiert in UBA 2018.

UBA (2013) Apel, P., Dubbert, W., Schwirn, K., Völker, D., Winde, C., Zietlow, B.; Einsatz von Nanomaterialien in Textilien; Datenblatt Nanoprodukte.

UBA (2014): Dubbert, W., Schwirn, K., Völker, D., Apel, P.; Datenblatt Einsatz von Nanomaterialien in der Energiespeicherung.

UBA (2018): Einsatz von Nanomaterialien in Kunststoffverpackungen; Umweltbundesamt.

Unger, W., Hodoroaba, V.-D., Shard, A. (2019): Characterization of Nanoparticles. Elsevier. 566.

VCI (2018): Verband der Chemischen Industrie e.V.; Nanomaterialien, Daten und Fakten.

von der Kammer, F., et al. (2011): Separation and characterization of nanoparticles in complex food and environmental samples by field-flow fractionation. *Trends in Analytical Chemistry*, 31: p. 32-49.

Vorbau, M., L. Hillemann, L., Stintz M. (2009): Method for the characterization of the abrasion induced nanoparticle release into air from surface coatings. *Journal of Aerosol Science*, 40(3): p. 209-217.

VZVB (2019): Bundesverband der Verbraucherzentralen und Verbraucherverbände - Verbraucherzentrale Bundesverband e.V.; Nanotechnologie in Lebensmitteln: Vorkommen und Kennzeichnung; <https://www.lebensmittelklarheit.de/informationen/nanotechnologie-lebensmitteln-kennzeichnung-aussicht>, abgerufen am 9.1.2019.

Wagner, S., et al. (2015): First steps towards a generic sample preparation scheme for inorganic engineered nanoparticles in a complex matrix for detection, characterization, and quantification by asymmetric flow-field flow fractionation coupled to multi-angle light scattering and ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 30(6): p. 1286-1296.

Working Party on Resource Productivity and Waste (2013): Incineration of Waste Containing Nanomaterials, ENV/EPOC/WPRPW(2013)3/FINAL.

WKO - Wirtschaftskammer Österreich (2019): Vernetzte Systeme - Nachhaltigkeitsagenda für Getränkeverpackungen, Juni 2019.

Wyser, Y., Adams, M., Avella, M., Carlander, D., Garcia, L., Pieper, G., Rennen, M., Schuermans, J., Weiss, J., (2016): Outlook and Challenges of Nanotechnologies for Food Packaging; *Packag. Technol. Sci.* 2016; 29: 615–648.

Zdiri, K., Elamri, A., Hamdaoui, M., Harzallah, O., Khenoussi N., Brendlé, J. (2018): Reinforcement of recycled PP polymers by nanoparticles incorporation. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 11:3, 296-311, DOI: 10.1080/17518253.2018.1491645.

Zhang, H., Bussini, D., Hortal, M., Elegir, G., Mendes, J., & Beneyto, M. J. (2016): PLA coated paper containing active inorganic nanoparticles: Material characterization and fate of nanoparticles in the paper recycling process. *Waste Management*, 52, 339-345.

Abkürzungen

% w/w	Gewichtsprozent
Abs.	Absatz
Ag	Silber
Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
AM	Advanced Material
Art.	Artikel
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BGBI.	Bundesgesetzblatt
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
CLP	Classification, Labelling and Packaging
CM	Chlorierter Ethylenkautschuk
CNT	Carbon Nanotubes (Kohlenstoffnanoröhren)
CO ₂	Kohlendioxid
CSM	Chlorsulfoniertes Polyethylen
CuO	Kupferoxid
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
EC	European Commission
ECHA	Europäische Chemikalienagentur
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
EFSA	European Food Safety Authority (Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit)
EG	Europäische Gemeinschaft
EPBP	European PET Bottle Platform
EPS	Extrudiertes Polystyrol
EU	Europäische Union
E-SBR:	Emulsion Styrol Butadien Rubber
EVAC	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer

EVOH	Ethylen-Vinylalkohol-Polymer
FCM	Food Contact Material
F&E	Forschung und Entwicklung
Gew.-%	Gewichtsprozent
GHS	Globally Harmonized System of Classification, Labelling and Packaging of Chemicals
HD-HS Silizium	Highly Dispersible High Surface Area Silizium
HD Silizium	Highly Dispersible Silizium
HDPE	High Density Polyethylen
hpts.	Hauptsächlich
idgF	in der geltenden Fassung
ISO	International Organization for Standardization
KMU	Klein- und Mittelunternehmen
LDPE	Low Density Polyethylen
LLDPE	Linear-low-density Polyethylen
Li	Lithium
LiCoO ₂	Lithiumkobaltoxid
NACE	Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne
NDA	Non Disclosure Agreement
M.-%	Masseprozent
MgO	Magnesiumoxid
Mio.	Millionen
MNM	Manufactured Nanomaterials (Synthetische Nanomaterialien)
Mrd.	Milliarden
NDA	Non Disclosure Agreement
NM	Nanomaterial(ein)
nm	Nanometer
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
PE	Polyethylen
PE-LD	Low-density Polyethylen

PE-LLD	Linear-low-density Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PET-A	Polyethylenterephthalat, amorph
PHB	Polyhydroxybutyrat
PLA	Polylactic Acid
PM _{0,1}	Partikel mit einem durchschnittlichen aerodynamischen Durchmesser von bis zu 0,1 µm, genannt ultrafeine Partikelfraktion.
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVAL	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
PVDC	Polyvinylidenchlorid
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals [Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH-Verordnung)]
SbD	Safe-by-Design
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Block-Copolymer
SiO ₂	Siliciumdioxid
SiO _x	Silikonoxid
S-SBR	Solution Styrol Butadien Rubber
t	Tonnen
TA	Technologiefolgenabschätzung
TiN	Titannitrid
TiO ₂	Titandioxid
TPS	Thermoplastische Elastomer auf Basis Styrol
UBA	Umweltbundesamt
usw.	und so weiter
VO	Verordnung
z.B.	zum Beispiel
ZnO	Zinkoxid

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium Verkehr, Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien


Autorinnen und Autoren: Manuela Kienegger, Erika Ganglberger, Maximilian Kinzl, Fritz Kleemann, Christoph Lampert, Wolfram Rhomberg, Joachim Thaler, Frank von der Kammer
Wien, 2019. Stand: 13. Dezember 2019

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundeskanzleramtes und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtssprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an empfaenger@bmvit.gv.at.

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a diagonal left edge that slopes downwards from the top right towards the bottom left.

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 1 123 45-0

email@bmvit.gv.at

bmvit.gv.at