

NanoDialog
der Bundesregierung

FachDialog 6.1
Chancen und Risiken aktiver, nanoskaliger
Materialien

Dokumentation



Autor*innen: Antonia Reihlen, Bernd Giese, Dirk Jepsen

Impressum

ÖKOPOL GmbH
Institut für Ökologie und Politik

Nernstweg 32–34
D – 22765 Hamburg

www.oekopol.de
info@oekopol.de

Tel.: ++ 49-40-39 100 2 0
Fax: ++ 49-40-39 100 2 33

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Einführung und Überblick: Was sind aktive, nanoskalige Materialien?	4
3	Anwendungen in der Medizin	7
3.1	Aktive, nanoskalige Materialien in der Medizin: Nano trifft Bio	7
3.2	Aktive, nanoskalige Materialien in pharmakologischen Anwendungen	9
3.3	Nanoskalige Sensoren für die optische Diagnostik.....	10
4	Quantum Dots - eine neue Materialklasse für die Displaytechnologie	12
5	Nano-Material-basierte elektronische Nase: Fluch oder Segen?	13
6	Nano-Sensoren für smarte Hochleistungswerkstoffe im Leichtbau	15
7	DNA als Baustoff für aktive Nanomaterialien	17
8	Elektroaktive Polymere	19
9	Licht gegen Antibiotika-Resistenz - neue photoaktive Materialien	21
10	Regulierung und ethische Aspekte	22
10.1	Regulative Aspekte bzgl. aktiver, nanoskaliger Materialien in REACH und CLP-Verordnung.	22
10.2	Regulatorische Aspekte und Governance.....	25
10.3	Ethische Aspekte im Umgang mit aktiven, nanoskaligen Materialien etc.	27
11	Zusammenfassung	30

1 Einleitung

Der NanoDialog der Bundesregierung zu Chancen und Risiken der Anwendung von Nanomaterialien findet seit 2006 statt und wird federführend vom Umweltministerium durchgeführt. Seit 2011 findet der Dialog in Form von 2-tägigen FachDialogen statt, in denen spezifische Themen in den Fokus genommen werden.

Der FachDialog zu Chancen und Risiken aktiver, nanoskaliger Materialien wurde aufgrund der Corona-Pandemie um fast zwei Jahre verschoben und fand mit 23 Teilnehmenden statt, um die Mindestabstände auch im Tagungsraum gewährleisten zu können. Anders als in den vorangegangenen FachDialogen beteiligte sich die Industrie in diesem leider nicht.

Ziel des Dialogs war es, einen Überblick über die in aktiven, nanoskaligen Materialien verwendeten Stoffe bzw. Bausteine sowie die typischen Strukturen und Funktionen dieser Materialien zu erhalten. Die konkreten Anwendungsbeispiele und potenziellen Verwendungsmöglichkeiten machten die Chancen und Risiken konkret diskutierbar und verdeutlichten den Stand der Forschung und Entwicklung. Vorträge zu den Herausforderungen der Regulierung sowie ethische Gedanken zur Anwendung von (aktiven) Nanomaterialien vervollständigten die Perspektive auf das Thema.

Im Folgenden werden die Inhalte der Vorträge und der darauffolgenden Diskussionen zusammengefasst. Erläuterungen, die auf Nachfragen erfolgten, finden sich in unmittelbarem Anschluss. In dieser Zusammenfassung wird nicht versucht, die enorme wissenschaftliche Detailtiefe der Vorträge wiederzugeben. Der Fokus liegt vielmehr auf den Kernaspekten bzgl. der Nutzen und Risiken dieser Materialien.

Im letzten Kapitel werden Kernaspekte des FachDialogs aus Sicht der Moderation zusammengefasst. Diese Zusammenfassung ist kein mit allen Teilnehmenden abgestimmtes Fazit.

2 Einführung und Überblick: Was sind aktive, nanoskalige Materialien?

Dr. Bernd Giese, Universität für Bodenkultur Wien, BOKU, ISR

Bernd Giese stellte anhand einer bibliometrischen Analyse wissenschaftlicher Veröffentlichungen zunächst das Forschungsfeld der aktiven, nanoskaligen Materialien

vor. Seit Beginn der 2000er Jahre werden demnach die Begriffe „active“ und „nano“¹ in deutlich zunehmendem Maße verwendet. Unter der Vielzahl beteiligter Disziplinen haben insbesondere die Chemie und die Materialwissenschaften eine hohe Bedeutung. Allerdings sind auch die Biochemie bzw. die Molekularbiologie unter den ersten 10 Disziplinen zu finden. Eine Netzwerkanalyse der in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen verwendeten Schlagworte ergab, dass hinsichtlich der Funktionalitäten insbesondere chemische Reaktionen (z. B. Radikalbildung, enzymatische Reaktionen), sensorische Aktivitäten (vor allem durch Plasmonresonanz), Energiespeicherung und Leuchteffekte von Bedeutung sind. Für die Herstellung aktiver, nanoskaliger Materialien werden neben Metallen, Übergangsmetallen und Kohlenstoffstrukturen wie Graphen auch synthetische Polymere sowie Biopolymere wie beispielsweise Nukleinsäuren oder Proteine verwendet.

Herr Giese ging anschließend auf die Frage der Abgrenzung aktiver, nanoskaliger Materialien von passiven Nanomaterialien ein und stellte dafür zunächst eine Einteilung von Roco² vor, nach der Nanostrukturen in Generationen unterschieden werden: Die zweite Generation aktiver Nanostrukturen zeigt gegenüber der ersten, passiven Generation während der Anwendung eine Änderung des Verhaltens bzw. ihrer Struktur.

Eine spätere Einteilung nach Tour³ schreibt aktiven Nanomaterialien im Gegensatz zu passiven eine „elaborate function“ zu.

In einer neueren Studie der ECHA⁴ wird vorgeschlagen, aktive von passiven Nanostrukturen anhand des thermodynamischen Gleichgewichts zu unterscheiden: Passive Materialien befinden sich in einem metastabilen thermodynamischen Gleichgewicht, während (re-)aktive in einem Nicht-Gleichgewichtszustand vorliegen und Energie aus ihrer Umgebung aufnehmen und umwandeln können. Bei der beteiligten Energie kann es sich beispielsweise um folgende Formen handeln:

- Chemische Energie, z. B. katalytische Funktionen, molekulare Prozessoren in der Informationsverarbeitung, photodynamische Therapie
- Elektrische Energie, z. B. elektrische Eigenschaften von Kohlenstoffdrähten, Graphen und Ag₂O für Transistoren, Halbleiter zur Energiespeicherung
- Strahlungsenergie, z. B. Quantum Dots zur Bildgebung, Plasmonresonanz

¹ Der Stern bedeutet, dass von der Suche auch zusammengesetzte Begriffe erfasst wurden, bei denen „nano“ lediglich den ersten Teil des Wortes darstellt, wie z. B. „nanomaterial“.

² Roco, M.C. (2004) Nanoscale Science and Engineering: Unifying and Transforming Tools. AIChE Journal, Vol. 50, No. 5

³ Tour, J. (2007). Nanotechnology: The Passive, Active and Hybrid Sides. Gauging the Investment Landscape from the Technology Perspective. Nanotechnology Law and Business, 361-373.

⁴ Camboni et al. (2019) A State of Play Study of the market for so called “Next Generation” Nanomaterials. European Chemicals Agency, Ref.-No. ECHA-2019-R-14-EN, ISBN: 978-92-9020-726-9, DOI: 10.2823/242422

- Mechanische Energie, z. B. in Nanomotoren, die durch chemische, akustische oder magnetische Effekte angetrieben werden, formveränderliche dreidimensionale RNA- und DNA-Strukturen.

In der Studie der ECHA wurde eine Marktrecherche durchgeführt und insgesamt 47 Anwendungen aktiver, nanoskaliger Materialien identifiziert. Es zeigte sich, dass der medizinische Bereich in dieser Sammlung überwiegt (Wirkstofftransport, Bildgebung und Theranostik). Weitere Schwerpunkte liegen im Bereich der Sensorik sowie elektronischer und elektrischer Bauteile und Geräte (Displays, RFID-Etiketten, Akkus etc.).

Lediglich 8 Anwendungen wurden in der ECHA-Studie einer dritten Generation „multifunktionaler Nanosysteme“ zugeordnet. Die identifizierten Technologien dieser komplexeren Stufe befanden sich jedoch zum größten Teil noch in der Forschungsphase. Der Schwerpunkt liegt auch hier auf medizinischen Anwendungen. Weitere Nutzungen wären die Datenspeicherung bzw. -verarbeitung.

Im Vortrag wurde darauf hingewiesen, dass im Bereich der aktiven, nanoskaligen Materialien sogenannte „Nanocarrier“ für den Wirkstofftransport vor allem im medizinischen Bereich ein bedeutendes Anwendungsfeld sind. Für die in räumlicher und zeitlicher Hinsicht möglichst zielgerichtete Freisetzung eines Wirkstoffs werden aktive Trägerstrukturen entwickelt. Komplexe Entwicklungen in diesem Bereich, die sogar über Gene für den Bauplan des Wirkstoffs sowie einen Syntheseapparat verfügen, weisen eine zunehmende Ähnlichkeit mit lebenden Zellen auf.

Herr Giese schloss mit der Beobachtung, dass die Nano-, Bio-, Informations- und Kognitionswissenschaften wie von Roco prognostiziert – wenn auch in einem noch sehr begrenzten Umfang – erkennbar konvergieren und eine zunehmende Integration der verschiedenen Ansätze in den hergestellten Materialien deutlich wird. Über Emissionen aktiver, nanoskaliger Materialien aus ihren Anwendungssystemen und die möglichen Expositionen von Mensch und Umwelt sind derzeit noch wenig Informationen verfügbar. Allerdings ist absehbar, dass mit bestimmten Anwendungen außerhalb geschlossener Systeme über den Lebensweg der Materialien auch Freisetzungen verbunden sein können.

Diskussion

Es wurde erörtert, ob die Abgrenzung von aktiven und passiven nanoskaligen Materialien anhand des thermodynamischen Gleichgewichts zielführend ist. Der Bezug auf die physikalischen Größen Energie und Arbeit wurde, verglichen mit früheren Definitionen, immerhin als objektiver angesehen. Es wurde jedoch kritisiert, dass bereits die Lösung von Materialien einen Grenzfall darstelle, die gemäß der Definition als „Aktivität“ gedeutet werden könnte. Zudem sei die Bezeichnung „aktive, (nanoskalige) Materialien“ in der Wissenschaft nicht geläufig. In der Medizin wäre

eine solche Trennung wenig sinnvoll, da an der Schnittstelle zu biologischen Systemen vielfältige Umwandlungen stattfinden.

Es wurde festgestellt, dass die Anwendbarkeit einer Definition von ihrem Zweck abhängt und es derzeit keinen Bedarf für eine trennscharfe Definition gibt.

Die thermodynamische Perspektive auf aktive, nanoskalige Materialien wurde jedoch auch als Möglichkeit gesehen, die Risikobewertung zu erleichtern. Würde ein aktives, nanoskaliges Material „vollständig abreagieren“ und somit auf ein passives Material zurückgeführt, könnten die Risiken (auch) dieser Form bewertet werden.

3 Anwendungen in der Medizin

3.1 Aktive, nanoskalige Materialien in der Medizin: Nano trifft Bio

Prof. Dr. Aigner, Universität Leipzig

Herr Aigner leitete ein, dass bei der Entwicklung aktiver, nanoskaliger Materialien für medizinische Anwendungen verschiedene Wechselwirkungen berücksichtigt werden (müssen). Am Beispiel von Nanocarriern zeigte er, dass das Zusammenspiel der Eigenschaften des Carriers mit dem Wirkstoff für die Effizienz und Geschwindigkeit der Freisetzung entscheidend ist. Da der Carrier mit biologischen Strukturen interagiert, kann die Verteilung, Aufnahme und Verarbeitung des Wirkstoffes auch darüber beeinflusst werden. Die biologische Umgebung kann Nanocarrier verändern, z. B. indem eine Hülle (sog. „Corona“) gebildet oder der Carrier abgebaut wird. Damit (externe) Stimuli, wie der pH-Wert oder Ultraschall, genutzt werden können, um eine gezielte Freigabe von Wirkstoffen zu ermöglichen, können Nanocarrier modifiziert werden.

Nanocarrier werden bereits sehr lange in der Medizin eingesetzt und können aus vielen verschiedenen Stoffen bestehen. Der Einsatz von aktiven, nanoskaligen Materialien zum Wirkstofftransport in der Medizin hat verschiedene Nutzen:

- Wirkstoffe können effizienter und gezielter zu ihren Wirkorten transportiert und dort gezielt „aktiviert“ werden.
- Wirkstoffe können eingesetzt werden, die ohne Carrier nicht nutzbar sind, weil sie z. B. (im Körper) zu instabil oder schlecht wasserlöslich sind oder (besonders bei gut wasserlöslichen) Zellmembranen nicht durchtreten können.
- Wirkstoffkombinationen können in einen Carrier verpackt und gleichzeitig im optimalen Mischungsverhältnis an einen Wirkort transportiert werden.
- Nebenwirkungen können durch geringere Einsatzmengen verringert werden und

abhängig von der Spezifität des Carriers auch Nichtzielgewebe vor dem Wirkstoff geschützt werden (bis hin zur zielgerichteten Einschleusung; „targeted delivery“).

Gemäß der bisherigen Forschung und da in der Zulassung von Pharmazeutika eine Nutzen-Risikoabwägung vorgenommen wird, wird lt. Herrn Aigner derzeit davon ausgegangen, dass der Nutzen der Nanocarrier in vielen Fällen die Risiken überwiegt. Abhängig von der Zusammensetzung der Carrier gebe es, z. B. bei natürlich vorkommenden oder gut ausscheidbaren Nanocarrier-Bausteinen, eine gute Verträglichkeit. Allerdings seien nicht alle theoretisch möglichen Konzepte auch für eine Anwendung geeignet, da mit einer erhöhten Komplexität auch Schwierigkeiten in der Entwicklung bzw. Produktion (z. B. beim Upscaling) und bei der Zulassung zu erwarten sind.

Herr Aigner zeigte zum Abschluss seines Vortrages verschiedene Forschungsaktivitäten zur Entwicklung neuartiger Tumormedikamente. Außerdem zeigte er Forschungen zu Wirkstoffen, die auf kleinen RNA-Molekülen (siRNA) basieren. Diese können Gene auf der Ebene der Expression inaktivieren, d. h. bevor das entsprechende Protein gebildet wird. siRNA-basierte Wirkstoffe sind damit sehr effizient und vielseitig, jedoch wegen ihrer stark negativen Ladung, ihrer Größe und ihrer Instabilität in Organismen auf Carrier angewiesen.

Diskussion

Auf Nachfrage führte Herr Aigner aus, dass die praktische Anwendung von (neuen) Nanocarriern in Pharmazeutika oft schwieriger wird, je komplexer die Moleküle sind. Dies läge u. a. daran, dass die Herstellungsprozesse komplexer und damit weniger reproduzierbar und steuerbar verlaufen – im Markt würden daher „einfache Systeme“ bevorzugt.

Eine Frage bezog sich darauf, wie „targeted delivery“ funktioniert. Herr Aigner erläuterte, dass sich die Nanocarrier nicht „aktiv“ zum Wirkort hinbewegen, sondern sich mit dem Blut im Körper verteilen. Durch die spezifischen Bindungsstellen der Carrier werden sie jedoch an ihren Zielzellen „festgehalten“ und der Wirkstoff dort angereichert. In der Leukämiebehandlung könnten Wirkstoffe so besonders effizient bei den Zielzellen ankommen und von diesen aufgenommen werden. In anderen Fällen sei diese Effizienz allerdings deutlich geringer.

In Bezug auf die Krebsforschung und das vorgestellte Beispiel stellte Herr Aigner klar, dass mit der „verpackten“ siRNA zunächst nur eine Verlangsamung des Tumorstwachstums erreicht werden konnte. Es sei jedoch auch zu berücksichtigen, dass die „neu verpackten“ Wirkstoffe oder die neuen, erst durch die Carrier einsetzbaren Wirkstoffe mit Therapien verglichen werden, in denen verschiedene Wirkstoffe und Verfahren kombiniert werden. Daher seien entsprechende Wirksamkeitsvergleiche

wenig aussagekräftig. Auch bestünde die Möglichkeit, die neuen Wirkstoffe mit den anderen, etablierten Therapeutika zu kombinieren und so zu besseren Therapien zu gelangen.

3.2 Aktive, nanoskalige Materialien in pharmakologischen Anwendungen

Prof. Dr. Andreas Herrmann

Herr Herrmann ergänzte die Ausführungen von Herrn Aigner mit Beispielen für vier Funktionalitäten, die mit aktiven, nanoskaligen Materialien als Carrier in der Pharmakologie ermöglicht werden können. Er betonte, dass DNA- und RNA-Moleküle oft als Gerüstmaterialien verwendet werden, weil sie verschiedene Überstrukturen erzeugen können, einfach herzustellen sind und leicht mit anderen Stoffen und Materialien verknüpft werden können. Grundsätzlich würden die Eigenschaften der verwendeten Materialien so genutzt, dass die Herstellung der gewünschten Strukturen selbstorganisiert abläuft.

Für Nanocarrier zeigte er, dass nicht nur ein Einschluss des Wirkstoffs möglich ist, sondern dieser auch „außen“ an Nanostrukturen gebunden werden kann. Bei antibiotischen Augentropfen würden mit Lipiden funktionalisierte DNA-Strukturen genutzt, die an der Augenoberfläche binden und so das schnelle Auswaschen des Wirkstoffes aus dem Auge vermeiden. Mit dieser Technologie könnten sowohl die Wirkstoffkonzentration in den Augentropfen als auch die Anwendungshäufigkeit stark reduziert werden, was eine bessere Akzeptanz der Patient*innen und eine Minderung der Nebenwirkungen zur Folge haben würde. Zudem zeigten Untersuchungen mit Immunstimulantien, die mithilfe von Nanopartikeln formuliert waren, dass aufgrund ihrer verbesserten Passage durch Zellmembranen eine stärkere Immunreaktion ausgelöst werden kann. Eine mögliche Anwendung bestünde in der immunbasierten Tumorbekämpfung.

Aktive, nanoskalige Materialien können lt. Herrn Herrmann auch dazu genutzt werden, um Wirkstoffe, wie beispielsweise Antibiotika, gezielter herzustellen. In Versuchen wurden mithilfe einer käfigartigen Nukleinsäurestruktur Bereiche eines zu modifizierenden (Wirk-)Stoffmoleküls abgeschirmt und somit vor ungewollten Reaktionen während der notwendigen Syntheseschritte geschützt. Andere Molekülregionen, die chemisch verändert werden sollten, blieben frei und konnten reagieren. So könnte die Wirkstoffsynthese wesentlich effizienter werden.

Herr Herrmann zeigte weiterhin, dass aktive, nanoskalige Materialien mit äußeren Stimuli gezielt aktiviert werden können. So könnten z. B. mit DNA-Strängen verpackte Wirkstoffe mit Ultraschall aktiviert werden, indem die DNA-Stränge durch die von den Schallwellen erzeugten Scherkräfte gespalten werden und damit die

Wirkstoffe freisetzen. Die Aktivierung mithilfe von Ultraschall böte gegenüber der schon bekannten Aktivierung mithilfe von Licht („Optogenetik“) den Vorteil einer größeren Eindringtiefe in Körpergewebe.

Ein letzter Bereich, in dem an aktiven, nanoskaligen Materialien geforscht wird, ist eine Zeitabhängigkeit bei der Wirkstofffreigabe im Körper. Hier würden gemäß Herrn Herrmann u. a. zelluläre, enzymatische Abbauprozesse genutzt, die zu einer Zeitverzögerung der Wirkstofffreisetzung führen.

Für alle Beispiele möglicher Verwendungen in der Pharmakologie sei die Funktionalität erst durch die Superstruktur der aktiven, nanoskaligen Materialien erreichbar.

Diskussion

In der Diskussion wurden Fragen zur Verwendung von DNA als „Baustoff“ gestellt, u. a. bezüglich der Stabilität gegenüber enzymatischem Abbau. Herr Herrmann antwortete, dass DNA ein gutes Trägermaterial ist, weil sie sich dreidimensional selbst organisiert und Strukturen bildet, ohne kovalente Bindungen einzugehen. Zudem könnte die DNA durch chemische Modifikationen stabilisiert werden und würde zu körpereigenen Substanzen abgebaut, weshalb davon auszugehen sei, dass keine Schädigungen zu erwarten sind.

3.3 Nanoskalige Sensoren für die optische Diagnostik

Prof. Dr. Wolfgang Fritzsche, Leibniz IHPT Jena

Herr Fritzsche erläuterte die Möglichkeiten, aktive, nanoskalige Materialien in der optischen Diagnostik einzusetzen.

Konventionelle optische, diagnostische Methoden setzen Fluoreszenzmarker ein, die anzeigen, ob ein „Fängermolekül“ ein Zielmolekül gebunden hat, also z. B. ein bestimmter Erreger in einer Probe nachgewiesen wurde oder nicht.

In der vorgestellten Methode „Localised Surface Plasmon Resonance“ (LSPR) werden Goldnanopartikel verwendet. Das Messprinzip basiert darauf, dass sich die Lage und damit Farbe der durch schwingende, freie Elektronen erzeugten Resonanz sowohl in Abhängigkeit von der Art, Größe und Form der verwendeten Partikel, als auch in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen verändert. Die Oberfläche der Goldpartikel wird dafür mit einem Rezeptor in Form eines DNA-Einzelstrangs ausgestattet, dessen Sequenz komplementär zur gesuchten DNA ist (z. B. die DNA eines Krankheitserregers). Bindet eine DNA an diesen Rezeptor, dann verändert sich die Farbe des vom Goldnanopartikel abgestrahlten Lichts im Vergleich zum „unbeladenen“ Partikel. Diese Farbänderung kann gemessen werden.

Die Goldpartikel-Sensoren sind fixiert und können durch Ablösung der Zielmoleküle regeneriert werden. In einem Mikroarray können Sensoren für unterschiedliche Zielmoleküle genutzt und ausgewertet werden. Herr Fritzsche benannte die folgenden Vorteile dieser Technologie gegenüber herkömmlichen Verfahren:

- Die Methode ermöglicht den markierungsfreien Nachweis von Molekülen, d. h. es müssen keine Markermoleküle in einem zusätzlichen Schritt an die Sensor-DNA oder die zu analysierende DNA gebunden werden.
- Hohe Sensitivität: Bereits wenige Bindungen reichen aus, um das Vorhandensein eines Zielmoleküls zu detektieren.
- Effizient und kostengünstig: Da mehrere Sensoren gleichzeitig genutzt werden können, kann das Probenmaterial in einer einzigen geeigneten Polymerasekettenreaktion (PCR) vervielfältigt werden.
- Die Auswertung ist vergleichsweise schnell durchführbar und kommt damit den Anforderungen kurzfristiger Analysen entgegen, wie beispielsweise bei der Suche nach dem Erreger einer Sepsis.

Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass die Auswertung im Labor erfolgen muss, es ist also kein „direktes Auslesen“ der Ergebnisse möglich.

Diskussion

Auf eine Nachfrage hin erläuterte Herr Fritzsche, dass Goldpartikel, welche keine Zielmoleküle binden, als Kontrollen fungieren, da sie im Testsystem das Licht der ursprünglichen Wellenlänge emittieren. In der Regel behalte die Mehrheit der Sensoren in einem Array ihre Grundfarbe.

In der Diskussion wurde geklärt, dass einer DNA-basierten Analyse immer eine PCR vorausgeht, da die zu detektierende DNA vervielfältigt (und aufgespalten) werden muss. Dieser Schritt sei geschwindigkeitsbestimmend und auch bei konventionellen Verfahren notwendig. Der Vorteil der LSPR sei, dass in nur einer PCR eine Mischung verschiedener DNAs vervielfältigt und dann direkt gemessen werden kann – also ein Multiplexen möglich ist, bei dem mit nur einer PCR eine Vielzahl (<100) verschiedener Analysen durchgeführt werden kann.

Zu den Anwendungsmöglichkeiten führte Herr Fritzsche aus, dass zwar derzeit hauptsächlich mit DNA gearbeitet würde, jedoch auch andere Moleküle detektiert werden könnten. Dies sei auch Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

4 Quantum Dots - eine neue Materialklasse für die Displaytechnologie

Dr. Armin Wedel, Fraunhofer IAP

Herr Wedel berichtete, dass die Trends in der Displaytechnologie in Richtung flexibler, interaktiver und tragbarer (wearable) Displays sowie zu mehr Brillanz der Farben und erhöhter Auflösung gingen. Zudem werde an Möglichkeiten gearbeitet, die Displayherstellung zu vereinfachen und Kosten zu verringern.

Herr Wedel führte aus, dass derzeit überwiegend anorganische Halbleitermaterialien als Quantum Dots (QDs) in Displays verwendet werden. QDs sind zwischen 1 und 10 nm groß und u. a. durch ihre chemische Zusammensetzung, ihre Bandlücke, Größe, Oberfläche und Form charakterisiert. Unterschiedliche Elemente würden eingesetzt, z. B. Silizium und Germanium sowie auch Verbindungen, z. B. Kadmiumselenid oder Indiumphosphid. Kadmiumverbindungen würden wegen der Beschränkungen in der RoHS-Richtlinie⁵ zunehmend durch andere Verbindungen ersetzt.

Quantum Dots emittieren Licht einer bestimmten Wellenlänge, wenn Elektronen nach einer optischen oder elektrischen Anregung wieder in das Valenzband zurückkehren. Die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts (Lichtfarbe) kann durch die Partikelgröße eingestellt werden. Die Größenverteilung der QDs bestimmt die Emissionsbreite (Breite des Emissionsspektrums) und die Oberfläche hat einen Einfluss auf ihre Helligkeit.

Herr Wedel erläuterte, dass die Herstellung von QDs u. a. als „Eintopfsynthese“ erfolgt. Die Partikel wachsen kontinuierlich an und wenn die Synthese gestoppt wird, können Partikel einer bestimmten Größe und damit einer Farbe entnommen werden. In weiteren Syntheseschritten können diese Kern-Partikel durch Anlagerung von z. B. Polymeren stabilisiert werden. So ist es möglich mit lediglich einer Art von Material alle benötigten Farben herzustellen.

Vorteile der Verwendung dieser Art von QDs sind gemäß Herrn Wedel:

- Es kann eine homogene Partikelgrößenverteilung erreicht und damit eine sehr schmalbandige Emission erzielt werden, die fast an die Emissionsbreite von Lasern heranreicht.
- Ein Material kann bis auf reines Blau sämtliche sichtbaren Farben erzeugen sowie auch im IR-Bereich strahlen.

⁵ Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten

- Die Herstellung kann in Lösung stattfinden und die Oberfläche gut funktionalisiert werden.
- QDs sind gegenüber Hitze, Sauerstoff, Licht und Wasser sehr unempfindlich.

QDs können bestehende Verfahren verbessern oder gänzlich neue Technologien ermöglichen. Beispiele für Anwendungen sind: Fluoreszenzmarker in Diagnostik oder Spektroskopie, Infrarot-Displays und Infrarot-Marker, Emittiermaterial in QLEDs (Quantum Dot-Leuchtdioden) oder QD-Lasern, Halbleiterschichten in Transistoren oder Absorbermaterialien in der Fotovoltaik.

Herr Wedel stellte aktuelle Forschungsarbeiten vor, in denen hybride QD-LEDs entwickelt werden. Hier fungieren die QDs als Emitterschicht und werden mit organischen Materialien kombiniert. Die Vorteile dieser hybriden LEDs bestehen in einer sehr hohen Effizienz und darin, dass die Synthese der QDs aus einem Material möglich ist (s. o.). Es wird angestrebt, Quantum Dots zu entwickeln, die ohne Indium, Cadmium und Selen auskommen.

Diskussion

Einige Teilnehmende fragten, ob der Umgang mit einigen der Halbleitermaterialien, die auch toxische Eigenschaften haben, sicher sein kann, einschließlich der Abfallphase. Herr Wedel erinnerte daran, dass diese Materialien in den jeweiligen Geräten und Schichten gekapselt vorliegen und daher eine Freisetzung nahezu ausgeschlossen ist. Allerdings könnten Emissionen in der Abfallphase entstehen.

Es wurde kritisch angemerkt, dass Indium ein sehr seltener Rohstoff ist, dessen Verfügbarkeit auf ca. 15 Jahre geschätzt wird. Hier sei absehbar, dass die Verwendung mittelfristig unmöglich würde und daher die Wiedergewinnung aus Abfall geboten wäre. Es konnte beim FachDialog nicht geklärt werden, ob eine Wiedergewinnung der Halbleiter aus Displays in Altprodukten möglich ist.

5 Nano-Material-basierte elektronische Nase: Fluch oder Segen?

Dr. Martin Sommer, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Herr Sommer erläuterte in seinem Vortrag die Funktionsweise einer elektronischen Nase und zeigte mögliche Anwendungen. Grundsätzlich seien elektronische Nasen der menschlichen Nase nachempfunden und könnten in bestimmten Anwendungen aufwendige, gaschromatographische Messungen ersetzen.

Eine elektronische Nase des KIT enthält laut Herrn Sommer insgesamt 16 Sensoren, die gemeinsam und gleichzeitig arbeiten. Das sensitive Material der Einzelsensoren ist Zinndioxid, welches seinen elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von den anwesenden Gasen ändert. Alle Sensoren der elektronischen Nase reagieren unterschiedlich auf anwesende Gase, sodass sich aus den 16 Einzelsignalen insgesamt charakteristische Signalmuster für einzelne Gerüche ergeben.

Damit eine elektronische Nase einen Geruch erkennen kann, muss sie diesen zunächst erlernen. Dies geschieht durch häufige Exposition der Rezeptoren mit dem entsprechenden Geruch. Dabei werden für die unterschiedlichen Gasmischungen Muster aus den Signalen der Rezeptoren gespeichert und als Referenz für den jeweiligen Geruch genutzt. Je nach geplanter Verwendung werden die elektronischen Nasen relevanten Gerüchen ausgesetzt. In der Anwendung werden dann neue Gerüche durch Vergleiche der Ähnlichkeit ihrer Muster mit den gespeicherten Mustern der zuvor erlernten Gerüche verglichen.

Mögliche Anwendungen von elektronischen Nasen sind: Diagnose von Krankheiten anhand der Gerüche von Bakterien (z. B. Parodontose), Frischekontrolle von Lebensmitteln, Drogen- und Sprengstoffsuche, Minendetektion, Brandmelder (Registrieren von Schmoren und Erkennen der Materialien, Unterscheidung von Zigarettenrauch und Brand), Endkontrolle industrieller Produkte, die stets den gleichen Geruch haben sollen oder die Kontrolle der Wasserqualität. Als Brandmelder in Akku-Auflade-Boxen, z. B. für e-Bikes, ist die elektronische Nase bereits auf dem Markt und im Einsatz.

Um eindeutige Ergebnisse zu bekommen, kann die elektronische Nase auch mit anderen Messungen kombiniert werden, z. B. der Feuchtigkeit und der Temperatur.

Der konkrete Nutzen der elektronischen Nase liegt in einer schnellen und kostengünstigen Analyse von bestimmten Sachverhalten. Herr Sommer benannte Herausforderungen beim Schutz persönlicher Daten als mögliches gesellschaftliches Risiko, da anhand von Gerüchen sehr persönliche Informationen, z. B. über den Gesundheitszustand eines Menschen, gewonnen werden können.

Diskussion

In der Diskussion wurde erläutert, dass die elektronische Nase aus lediglich einem Material gefertigt wird und in der Herstellung kostengünstig und universell einsetzbar ist. Allerdings müsse jede Nase einzeln „lernen“. Es gebe keine universelle Referenz für Geruchsmuster, die verwendet werden kann.

In einigen Wortmeldungen wurde darauf hingewiesen, dass Nanofasern gesundheitlich bedenklich sein können, weil (rigide) Fasern die Lunge physikalisch

schädigen können. Auch längere Fasern können problematisch sein, da sie zu kürzeren, bedenklicheren Fasern brechen können. Es wurde ergänzt, dass das – neben Zinndioxid alternativ – verwendete Wolframoxid in Nanoform als genotoxisch angesehen wird. In den Messungen der Toxizität von Zinndioxid sei zu berücksichtigen, dass diese in oralen Studien ermittelt wurden und die Bioverfügbarkeit gering ist; für eine inhalative Exposition gebe es bislang keine Daten. Allerdings sei die verwendete Menge der Nanofasern sehr gering und die Fasern so fest auf der Oberfläche der elektronischen Nase verhaftet, dass die Gefahr einer Ablösung der Fasern ebenfalls sehr gering sei.

Herr Sommer erläuterte auf eine entsprechende Nachfrage hin, dass die elektronischen Nasen durch Abdampfen gereinigt werden können. Lediglich bei starken Ablagerungen auf den Sensoren, z. B. von Fetten oder Stäuben, könnten die elektronischen Nasen nur aufwendig gereinigt werden oder gar Schaden nehmen. Jedoch Sorge das Vorhandensein mehrerer Sub-Sensoren in einer eNase für eine gewisse Redundanz und damit für Robustheit gegenüber dem Ausfall einzelner Sub-Sensoren.

6 Nano-Sensoren für smarte Hochleistungswerkstoffe im Leichtbau

Prof. Robert Böhm, HTWK Leipzig

Herr Böhm stellte in seinem Vortrag zunächst die COST Action vor, eine europäische Kooperation in Wissenschaft und Technik, die verschiedene Aktivitäten fördert. Das von dieser COST Action geförderte Netzwerk EsSENce⁶, aus dem Herr Böhm einige Arbeiten vorstellte, hat verschiedene Ziele. Unter anderem sollen die Eigenschaften von kohlenstoffbasierten Nanomaterialien verbessert, ihre Anwendungsbereiche erweitert und die Kosten ihrer Fertigung und Anwendung gesenkt werden. Das Netzwerk soll zudem zu einer führenden Position der EU im Bereich nanopartikelverstärkter Werkstoffe beitragen, Kooperationen mit internationalen Unternehmen fördern und über wissenschaftliche und technologische Fortschritte und Herausforderungen informieren.

Herr Böhm erläuterte, dass in Verbundwerkstoffen verschiedene zusätzliche Funktionen von Materialien integriert werden können. Von besonderem Interesse für das Netzwerk sei die Anwendung von Sensoren und Sensornetzwerken, um

⁶ <http://www.essence-cost.eu/>

„intelligente“ Materialeigenschaften zu erzeugen. Hierdurch könnten u. a. Fortschritte bei Sicherheitsaspekten möglich werden. Er zeigte am Beispiel eines Motorradhelms mit Drucksensoren, dass diese nach einem Unfall die Diagnose möglicher Kopfverletzungen erleichtern und damit die medizinische Hilfe verbessern könnten.

Als weiteres Beispiel für integrierte Sensoren stellte Herr Böhm Flugzeugturbinen vor, die mithilfe integrierter, piezokeramischer Sensoren Schäden an den Rotorblättern erkennen und melden könnten. Gegenüber konventionellen Systemen sei ein wichtiger Vorteil, dass die komplizierte Verkabelung der Sensoren entfiere, da diese sowohl über eine Energiequelle als auch über Möglichkeiten der Kommunikation verfügten. Ähnliche Anwendungsmöglichkeiten bestünden für Rotorblätter von Windkraftanlagen.

Herr Böhm benannte einige Vorteile der Verwendung dieser Sensoren in Verbundwerkstoffen anstelle der Anwendung „konventioneller Elektronik“:

- Aufwendige Fertigungsprozesse werden vermieden, da die Sensoren bereits im Werkstoff integriert sind. Es sind keine komplexen Werkzeuge oder präzise Positionierungen und Verkabelungen notwendig.
- Die Datenverarbeitung, Speicherung und Auswertung findet im smart material statt und ist somit weniger aufwändig; lediglich „Schäden“ werden kommuniziert.
- Herkömmliche Elektronik wird in Bauteilen in der Abfallphase oft nicht abgetrennt. Sie verunreinigt dann die Materialströme und erschwert das Recycling. Auch integrierte Sensoren bringen diese Problematik mit sich.

Herr Böhm gab ein weiteres Beispiel für die Anwendung aktiver, nanoskaliger Materialien an: Die Sanierung von Betonbrücken. Alternativ zum Abriss und Neubau, der große Mengen von Zement benötige, könnten Brücken zumindest teilweise mit Carbonbeton ertüchtigt werden, so dass kein Neubau notwendig wäre und Zement und damit erhebliche CO₂-Emissionen gespart werden könnten. In den Beton integrierte, nanoskalige Sensoren könnten zudem den Zustand der (ausgebesserten) Brücken messen und eventuelle Schäden melden. Für diese „Selbstdiagnostik von Brücken“ kämen Sensoren auf der Basis von CNTs, Graphen, Ruß oder Carbonfasern in Frage.

Als Beispiel für ein Material bzw. Produkt, das zwei Funktionen in sich integriert, stellte Herr Böhm die Strukturbatterie für elektrische Fahrzeuge oder Flugzeuge vor. Diese sei einerseits ein „tragendes Bauteil“ aufgrund der steifen und hochfesten Struktur des Materials und andererseits ein Energiespeicher. Strukturbatterien könnten den Platzbedarf und das Gesamt-Gewicht von Batterien verringern, was im Bereich der Mobilität zu Treibstoffeinsparungen führen und ggf. auch die Nutzung elektrischer Energie als Antrieb für Flugzeuge ermöglichen könnte.

Herr Böhm schloss seinen Vortrag mit der Feststellung, dass nano-verstärkte Verbundwerkstoffe multifunktionale Anwendungen ermöglichen, entsprechende Produkte jedoch derzeit noch keine Marktreife erlangt hätten und daher weitere Unterstützung in der Produktentwicklung und Vermarktung notwendig sei.

Diskussion

Es wurde darauf hingewiesen, dass die Verwendung von CNTs in Kunststoffen, Verbundwerkstoffen oder Zement mit gesundheitlichen Risiken verbunden sein kann, da einige CNTs eine karzinogene Wirkung haben. Zudem gebe es sowohl im Recycling carbonverstärkter Rotorblätter als auch bei der thermischen Verwertung technische Schwierigkeiten.⁷ Daher seien in der Entwicklung dieser Produkte Aspekte der Abfallwirtschaft zu berücksichtigen und/oder bräuchte es neue Abfallbehandlungsverfahren, um die Materialien weiter verwerten zu können.

7 DNA als Baustoff für aktive Nanomaterialien

Dr. Enzo Kopperger, TU München

Auch Herr Kopperger betonte, dass DNA ein sehr gutes Baumaterial für nanoskalige Strukturen ist, unter anderem, da sie sowohl fest (Doppelstrang) als auch flexibel (Einzelstrang) ist.

Herr Kopperger erläuterte, wie dreidimensionale Nanostrukturen hergestellt werden können: Ein längerer Gerüststrang und verschiedene (kürzere) sog. Klammerstränge werden zusammengegeben. Die Klammerstränge binden an verschiedene Teile des Gerüststranges durch Basenpaarung. Damit dies möglich ist, muss sich der Gerüststrang „falten“ und es entsteht eine dreidimensionale Struktur. Dieser Prozess ist selbstorganisiert. Am Computer können die Sequenzen der Klammerstränge, anhand der gewünschten Struktur und der Sequenz des Gerüststranges ermittelt werden.

Herr Kopperger stellte eine Struktur vor, die an der TU München hergestellt wurde und aus einem Stab besteht, der auf einem Lager aufsitzt und um seine Achse rotieren kann. Er erläuterte, dass aufgrund der Ladung der DNA der Stab mithilfe eines wechselnden elektrischen Feldes in Rotation versetzt werden kann. Dabei seien auch Wechsel der Drehrichtung möglich. Um die Rotation sichtbar zu machen,

⁷ Zur Verwertung von Kompositmaterialien gibt es allerdings auch Forschungsaktivitäten, z. B. <https://eurecomp.eu/>

wurde der Stab mit einem Fluoreszenzmarker versehen und so verlängert, dass eine Auslenkung optisch auflösbar wurde.

Eine mögliche Anwendung dieses Nanoroboters könnte lt. Herrn Kopperger im Feld der Sensorik sein: Durch Anheftung eines Rezeptormoleküls und Bindung mit dem Zielmolekül würde der Stab in seiner Rotation gestoppt und das Fluoreszenzsignal an einer Stelle sichtbar (statt als Kreis). Im Vergleich zu konventionellen Systemen könnten bei einem solchen Sensor verschiedene Waschschriffe entfallen. Zudem ließen sich die DNA-basierten Sensoren vergleichsweise kostengünstig herstellen.

Herr Kopperger stellte auch vor, dass die Nanostruktur in veränderter Form in Anlehnung an „Aufziehspielzeuge“ auch als Energiespeicher verwendet werden könnte. Hierfür müssten anstelle eines freien Lagers zwei Stränge genutzt werden, um den Stab am Substrat zu binden. Wird der Stab elektrisch angetrieben, so würde dabei sein zweisträngiges Lager verdrillt und dadurch mechanische Energie gespeichert. Beim „Entwinden“ der verdrillten Stränge könnte diese Energie wieder in eine Rotation des Stabes übersetzt werden.

Laut Herrn Kopperger lägen Hauptanwendungen der dreidimensionalen Nanostrukturen im Bereich der intelligenten Wirkstoffträger („smart drug carrier“) und Sensoren. Die vorgestellte Faltungsmethode erlaube viele Freiheitsgrade, wodurch auch mechanische Prozesse auf der Nanoebene ermöglicht werden könnten. Gerade hier befindet sich die Forschung aber noch in einer sehr frühen Phase.

Diskussion

Auch nach diesem Vortrag wurden verschiedene Nachfragen bzgl. der Stabilität der Strukturen und der Möglichkeiten einer Aktivierung durch ein Magnetfeld anstelle eines elektrischen Feldes, z. B. für medizinische Anwendungen gestellt. Herr Kopperger erläuterte, dass die Strukturen stabil wären. Aktivierungen solcher Strukturen mittels Magnetfelder wurde bisher nur mit Magneten in der Mikrometerskala erforscht, seien aber prinzipiell auch mit kleineren Magnetpartikeln denkbar.

Einige Teilnehmende merkten an, dass die Verwendung von DNA in der Öffentlichkeit auch mit Skepsis gesehen würde, nicht zuletzt aufgrund von „Erzählungen“ über sich selbst replizierende Nanoroboter, welche die Biomasse der Erde für ihre Vermehrung verbrauchen könnten („grey goo“-Szenario). Herr Kopperger erwiderte hierauf, dass die Forschung noch sehr weit von solchen Nanomaschinen entfernt sei.

8 Elektroaktive Polymere

Ivica Kolarić, Fraunhofer IPA

Herr Kolarić berichtete von Forschungsaktivitäten über künstliche Muskeln. Diese seien denen des Menschen „angenähert“ und/oder von der Natur inspiriert, könnten jedoch deutlich stärker sein und vielfältig eingesetzt werden.

Grundsätzlich werden laut Herrn Kolarić bisher Menschen und Roboter durch Schranken getrennt. Aufgrund der hohen Beschleunigung könnten Menschen mit den Robotern zusammenstoßen und sich aufgrund der steifen/harten Materialien schwer verletzen. Künstliche Muskeln könnten die Notwendigkeit dieser räumlichen Trennung aufheben oder verringern, da sie „weich“ seien oder auf entsprechende Reize hin weich werden könnten und sich so die Verletzungsgefahr deutlich verringere.

Es gibt verschiedene Materialien, aus denen künstliche Muskeln hergestellt werden können, u. a. Metalle, ionische oder dielektrische Materialien, CNTs und dielektrische Polymere. In seinem Vortrag zeigte Herr Kolarić Beispiele für künstliche Muskeln, die aus dielektrischen (elektroaktiven) Polymeren und ionischen Aktuatoren bestehen. Die dielektrischen Polymere funktionieren wie ein Kondensator. Sie können sich relativ stark räumlich ausdehnen und verschieben und sind aufgrund ihres einfachen Aufbaus relativ effizient. Sie können starke mechanische Kräfte entwickeln, wobei dielektrische Polymere schnell und mit hohen starken Spannungen arbeiten, während ionische langsamer sind, aber auch geringere Spannungen benötigen und daher für die Medizintechnik besonders interessant sind.

In der Medizin würden elektroaktive Polymere bereits als Ventile, die Schläuche verschließen oder öffnen sowie als Pumpen für die Dosierung von Medikamenten eingesetzt. Diese peristaltischen Pumpen können präzise eingestellt werden und somit sehr kleine Mengen an Medikamenten (kontinuierlich) dosieren. Des Weiteren würden derzeit elektroaktive Polymere als Demonstratoren in Filterpapieren und Wundverbänden eingesetzt.

Mögliche zukünftige Anwendungen in der Medizin, welche derzeit in der Entwicklung sind, wären Präzisionswerkzeuge für die Endoskopie oder minimalinvasive Chirurgie, flexible Stents, synthetische Muskeln für den Einsatz im Körper, Retinaimplantate sowie, in ferner Zukunft, die Herstellung künstlicher Organe unter Verwendung von additiven Fertigungstechnologien.

Herr Kolarić stellte zudem einige möglich Anwendungen von elektroaktiven Polymeren in nicht-medizinischen Bereichen vor. Ein Forschungsprojekt beschäftige sich mit der Herstellung von künstlichen Membranen, die durch integrierte künstliche Muskeln ihre Form und Oberfläche verändern können, um auf äußere Reize zu

reagieren. Eine Anwendungsmöglichkeit dieser Membranen könnte in der regulierbaren Verkleidung von Gebäuden liegen. Künstliche, regelbare Poren in den Membranen könnten den Luftaustausch im Gebäude regulieren und durch den Einsatz entsprechender Sensoren, eine optimale Belüftung herstellen.

Die Kombination künstlicher Muskeln mit Sensoren ermögliche weitere Anwendungen, um die Interaktion zwischen Mensch und Maschine zu erweitern.

Hinsichtlich der Risikobewertung spricht sich Herr Kolarić für eine frühzeitig im Innovationsprozess ansetzende prospektive Risikoanalyse aus, deren Ergebnisse in den weiteren Entwicklungsschritten berücksichtigt werden.

Diskussion

In der Diskussion wurden Nachfragen zur Verwendung künstlicher Muskeln als Prothesen, Implantate oder zur Verbesserung der Körperfunktionen („human enhancement“) gestellt. Herr Kolarić erläuterte, dass in der traditionellen Prothetik sog. Exoskelette z. B. nach Amputationen von Körperteilen eingesetzt werden. Um elektroaktive Polymere im Körper einzusetzen, bedürfe es jedoch weiterer Forschung. Hier zeigten sich vielversprechende erste Ergebnisse aus Arbeiten zur Prüfung der sensorischen Eigenschaften und Verträglichkeit. Herr Kolarić sah die größten Potenziale von elektroaktiven Polymeren im Ersatz von Muskeln und Organen. Hierfür seien Hybride herzustellen, die sowohl aus natürlichem Gewebe als auch aus künstlichen Muskeln bestehen.

Die Erfassung der Intention eines Menschen zu Steuerung von Muskeln etc. sei sehr komplex, wie auch die Ableitung einer angemessenen Reaktion darauf. Hierfür seien vielfältige Sensoren notwendig, ebenso wie eine entsprechend komplexe Datenverarbeitung.

Im Kontext des „human enhancement“ informierte Herr Kolarić über Forschungen zu Anzügen für Soldaten, die deren körperliche Fähigkeiten unterstützen oder durch eine Faserverstärkung das Leben der Soldaten schützen sollen. Solche Anzüge könnten auch z. B. für Menschen mit Handicap hilfreich sein. Ob und welche Zwecke hier unterstützenswert sind, erfordere weitergehende ethische Betrachtungen.

9 Licht gegen Antibiotika-Resistenz - neue photoaktive Materialien

Prof. Dr. Anzhela Galstyan, Universität Duisburg/Essen

In ihrem Vortrag stellte Frau Galstyan vor, wie Photosensibilisatoren auf Phthalocyaninbasis bei der Herstellung von Materialien im Nanomaßstab verwendet und durch Licht aktiviert werden können. Die aktivierten Photosensibilisatoren katalysieren die Bildung weiterer, reaktiver Moleküle, z. B. von Singulett-Sauerstoff, welche dann eine antimikrobielle bzw. oxidative Wirkung haben und zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt werden können.

Ein Einsatzbereich für photoaktive, nanoskalige Materialien ist lt. Frau Galstyan die Desinfektion von Trink- und Abwasser. Traditionell werden zur Desinfektion z. B. zusätzliche Chemikalien, Ozon oder UV-Licht eingesetzt. Diese Verfahren sind energieaufwendig und können zur Bildung toxischer Substanzen führen. Der Einsatz von solarbetriebenen, photokatalytischen Verfahren könnte diese Verfahren ersetzen.

Ein weiterer Einsatzbereich für die photodynamische Inaktivierung von Mikroben könnte im Gesundheitsbereich liegen. Frau Galstyan sah sowohl Anwendungen zur Wundbehandlung als auch für die Flächendesinfektion als möglich an. Da die Wirkung photoaktiver Substanzen lichtabhängig sei, wäre sie sowohl lokal als auch zeitlich zu begrenzen und damit könne z. B. eine Schädigung des „erwünschten Bioms“ der Haut vermieden werden.

Frau Galstyan betonte, dass der Nutzen von photoaktiven Substanzen in der Desinfektion insbesondere darin läge, dass keine Resistenzbildung auftreten kann. Im Gegensatz zu Antibiotika sei die Wirkung sehr schnell und Bakterien und Viren, wie auch die Biofilme, in denen sie sich aufhalten, hätten keine Möglichkeit, sich dagegen zu wehren.

Phthalocyanine könnten chemisch modifiziert werden, um z. B. eine bestimmte Löslichkeit oder Stabilität herzustellen. So könnten diese Verbindungen in verschiedenen Umgebungen eingesetzt werden. Dafür könnten sie auch mit Nanocarriern verbunden werden oder in elektrogesponnene, nanoskalige Membranen integriert werden.

Diskussion

In der Diskussion wurde erläutert, dass nicht nur Phthalocyanine, sondern auch andere fotoaktive Moleküle genutzt werden können, um die vorgestellten Effekte zu erzielen. Frau Galstyan erläuterte, dass die Art der Moleküle den Grad der Aktivität

beeinflusst. So verändere sich die Wirksamkeit der Phthalocyanine mit der Art des zentralen Metallmoleküls: Zink, Aluminium und Siliziumderivate sind besonders aktiv und einige Verbindungen sind zurzeit in klinischen Studien in Europa oder sind zugelassen für Behandlungen in Asien und Lateinamerika.

Frau Galstyan erläuterte zudem, dass photoaktive Materialien auch dazu genutzt werden können, um Mikroschadstoffe in Kläranlagen abzubauen. Diese Materialien könnten teilweise Abbauprozesse katalysieren, die derzeit in Kläranlagen noch nicht stattfinden und so die Qualität gereinigten Abwassers verbessern.

Photoaktive Fasern in Mund-Nasenbedeckungen sind gemäß den Ausführungen von Frau Galstyan eine sich bereits im Markt befindliche Anwendung dieser Materialien. Hierzu wurde aus dem Kreis der Teilnehmenden angemerkt, dass diese Anwendungen nicht immer gesetzeskonform seien, da verschiedene Regelungen einzuhalten sind, u. a. eine Auslobung als Biozidprodukt.

Es wurde darauf hingewiesen, dass es eine Gruppenbeschränkung für die Verwendung von Kupfer-Phthalocyaninen in Tätowier-Tinten gibt. Dies sei ein Hinweis darauf, dass auch in anderen Anwendungen Beschränkungen zukünftig möglich sein könnten. Dies sollte bei der Auswahl von aktiven, nanoskaligen Materialien für möglich zukünftige Anwendungen von Anfang an berücksichtigt werden.

10 Regulierung und ethische Aspekte

10.1 Regulative Aspekte bzgl. aktiver, nanoskaliger Materialien in REACH und CLP-Verordnung

Lars Tietjen, Umweltbundesamt

Herr Tietjen stellte dar, dass der zentrale Anknüpfungspunkt im Chemikalienrecht der chemische „Stoff“ ist, welcher per rechtlicher Definition z. B. das Ergebnis einer Synthese ist, auch wenn dieses aus chemischer Sicht genau genommen meist ein Gemisch und keine Einzelsubstanz ist. Hersteller und Importeure von Stoffen und Gemischen (absichtlich vermischte Stoffe) sind für die Sicherheit der von ihnen in Verkehr gebrachten Produkte verantwortlich. Grundsätzlich funktionieren der aktuelle Regelungsrahmen für alle Chemikalien, einschließlich Nanomaterialien.

Herr Tietjen erläuterte, dass das Vorliegen bzw. die Kenntnis der gefährlichen Eigenschaften von Stoffen der Auslöser für weitergehende Maßnahmen zum

Risikomanagement ist. Daher sah Herr Tietjen es bzgl. aktiver, nanoskaliger Materialien als besonders kritisch an, dass:

- Teilweise Prüfmethode n fehlen oder nicht anwendbar sind: Aktive, nanoskalige Materialien können sich, wie auch Nanomaterialien, in Testsystemen anders verhalten als für die Prüfmethode vorausgesetzt. So kann z. B. aufgrund des Adsorptionsverhaltens oder bei schwer löslichen Stoffen wegen ihrer Sedimentation die Konzentration im Testsystem nicht eindeutig bestimmt werden und es ist schwierig zu simulieren, wie sich die Materialien entlang ihres Lebenszyklus verhalten. Partikulär vorliegende Materialien sind z. B. im wässrigen Testsystem nicht homogen verteilt und die tatsächliche Exposition der Organismen im Testsystem ist ggf. ortsabhängig. Können gefährliche Eigenschaften aufgrund fehlender Prüfmethode n nicht ermittelt werden, kann die Regulierung nicht greifen.
- Polymere sind im aktuellen System unzureichend abgedeckt, da unter REACH nur die Monomere zu registrieren und zu prüfen sind, nicht jedoch die Polymere. Eine Änderung der REACH-Verordnung⁸ bzgl. der Registrierung von Polymeren ist zwar in der Diskussion, bis eine neue Regelung in Kraft tritt, fehlen jedoch die Informationen für eine chemikalienrechtliche Einstufung. Polymere nehmen unter den aktiven, nanoskaligen Materialien eine hervorgehobene Rolle ein.
- Bei einigen neuartigen Materialien eine Einordnung in die Definitionen des Chemikalienrechts schwerfällt und bei Einordnung (als Gemisch oder Erzeugnis) ggf. Informationen zu den gefährlichen Eigenschaften fehlen bzw. nicht erzeugt werden müssten.

Herr Tietjen stellte einige der Prozesse auf EU-Ebene zur Veränderung des Regelungsrahmens für Chemikalien vor. Insbesondere die [Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit](#) beinhalte diverse Maßnahmen, um die Ziele einer schadstofffreien Umwelt und der Beendigung der Verschmutzung zu realisieren. Die REACH-Verordnung erzeuge das Wissen über Chemikalien, auf dem das Risikomanagement fußen könne.

Herr Tietjen ergänzte, dass Innovationen und das Design von Chemikalien bereits mögliche adverse Wirkungen ausschließen müssten. Dies zu unterstützen sei u. a. ein Ziel der Entwicklung eines Rahmens für die Bewertung der Sicherheit und Nachhaltigkeit von Chemikalien (Safe and Sustainable by Design).

⁸ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)

Diskussion

Es wurde eine mangelnde Transparenz über das Vorhandensein von Stoffen in Produkten in der Wertschöpfungskette und für die Verbraucher*innen beklagt. Auch seitens der Wissenschaft bestünde hier ein Informationsbedarf, z. B., um Emissionen modellieren zu können. Ein Register fehle und die Datenbank der ECHA ([Scip](#)) sei nicht hinreichend, um die unterschiedlichen Informationsbedarfe zu decken. Es wurde vorgeschlagen, eine entsprechende Berichtspflicht für nachgeschaltete Anwender von Chemikalien einzuführen, um mehr Transparenz herzustellen.

Herr Tietjen ergänzte, dass im Rahmen der Revision der Ökodesign-Richtlinie⁹ die Einführung eines sog. Produktpasses geplant ist, der über den Gehalt eingestufte Stoffe informieren soll. Er schränkte allerdings ein, dass diese Regelung vorsehe, dass die EU-Kommission einzelne Produktgruppen reguliert, d. h. nicht sofort und automatisch für alle Produkte ein Produktpass erforderlich werden wird. Ein weiterer Nachteil sei, dass im Vorschlag der EU-Kommission¹⁰ im Produktpass nur harmonisiert eingestufte, aber keine selbsteingestufte Stoffe berücksichtigt werden müssten. Informationen über Stoffe in der Umwelt könnten auch über die Monitoring-verpflichtungen aus dem Bodenschutz oder der Wasserrahmenrichtlinie erhalten werden. Allerdings sei unklar, ob und wie erweiterte oder neue Pflichten etabliert werden können.

Auf die Frage, ob aktive, nanoskalige Materialien, z. B. die Nanoroboter, ein chemischer Stoff oder vielleicht auch ein Erzeugnis sind, antwortete Herr Tietjen, dass seiner Meinung nach diese Strukturen so klein seien, dass die Zusammensetzung für die Funktion entscheidend ist. Die Definition sei zudem nicht für diese Strukturen erarbeitet worden. Somit seien aktive, nanoskalige Materialien seiner Meinung nach als Stoffe bzw. Gemisch zu betrachten.

Bezüglich der Testmethoden erläuterte Herr Tietjen, dass Tests für aktive, nanoskalige Materialien alle möglichen Wirkungen abdecken müssten und auch zu berücksichtigen hätten, wie diese sich in der Umwelt verändern. Es sei notwendig, dass die Industrie stärker an der Entwicklung von Testmethoden beteiligt wird und insbesondere das Verhalten und die Aktivität der Materialien sehr konkret und präzise beschreibt. Dies wurde von den Teilnehmenden bekräftigt, die eine Mitarbeit der Industrie an den Testmethoden als eine Form der Wahrnehmung der

⁹ Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte

¹⁰ https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_de

Eigenverantwortung ansahen und eine Möglichkeit, die sichere Verwendung der Materialien sicherzustellen.

10.2 Regulatorische Aspekte und Governance

Andrea Haase, BfR

Frau Haase begann ihren Vortrag mit der Feststellung, dass es derzeit weder eine trennscharfe Definition für advanced materials noch für aktive, nanoskalige Materialien gibt und dass aus regulatorischer Sicht diese derzeit auch nicht benötigt werden. Wie auch Herr Tietjen stellte sie fest, dass es im Rahmen der Datenerfassung unter der Chemikalienregulation REACH aktuell keine Möglichkeit gibt, Eigenschaften zu erfassen, die sich in der Anwendung und als Antwort auf einen externen Reiz verändern sollen. Sie knüpfte an die zuvor im FachDialog vorgestellten Entwicklungen im Bereich der Nanocarrier als ein Beispiel für aktive nanoskalige Materialien an, die ausgehend von Anwendungen in der Medizin nun auch in weiteren Produkten, z. B. in Kosmetika, Lebensmitteln sowie Biozidprodukten und Pflanzenschutzmitteln zu finden sind.

Frau Haase informierte, dass in der Kosmetikverordnung¹¹, der Novel Food Verordnung¹² und der Pflanzenschutzmittelverordnung¹³ sowie den dazu gehörigen Leitfäden zur Bewertung keine konkreten Vorgaben gemacht werden, wie Nanocarrier bzgl. der Sicherheit von Mensch und Umwelt zu bewerten sind. In den jeweiligen Leitfäden zu den Verordnungen werde lediglich darauf hingewiesen, dass eine Sicherheitsbewertung durchgeführt werden soll, wobei sowohl die Carrier und die „Ladung“ einzeln sowie „Ladung“ und Carrier als Einheit zu berücksichtigen sind.

In der Pflanzenschutzmittelverordnung fehle zudem aktuell immer noch eine Definition von „Nanopestiziden“, weswegen an die Hersteller derzeit keine nanospezifischen Anforderungen an die Erzeugung von Sicherheitsinformationen gestellt würden. Frau Haase berichtet, dass bereits Mikroemulsionen im Einsatz sind, um die Effizienz der Pflanzenschutzmittel zu erhöhen, bzw. die Wirkstoffe vor Umwelteinflüssen zu schützen und sie so langlebiger zu machen. Im Kontext eines IUPAC Workshops wurde ein [Vorschlag für eine Teststrategie](#) entwickelt, um die Sicherheit von Nanocarriern und Wirkstoffen zu bewerten und dabei Tierversuche möglichst zu vermeiden. Hierbei sei die Fähigkeit des Carriers Membranen zu durchtreten und die

¹¹ Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über kosmetische Mittel

¹² Verordnung (EU) 2015/2283 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 über neuartige Lebensmittel

¹³ Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln

Geschwindigkeit der Freisetzung des Wirkstoffs ausschlaggebend dafür, ob eine separate Bewertung für die Einheit aus Carrier und Wirkstoff notwendig ist, was ggf. auch Tierversuche beinhaltet.

Zum Abschluss ihres Vortrags stellte Frau Haase eine behördenübergreifende Arbeitsgruppe vor, die an der Entwicklung eines Frühwarnsystems für advanced materials (einschließlich aktiver, nanoskaliger Materialien) arbeitet. Diese Arbeitsgruppe habe eine Arbeitsdefinition für advanced materials erarbeitet und beschrieben, anhand welcher Parameter sie Materialien als besorgniserregend ansieht. Im Frühwarnsystem werden für einen Screening Schritt und eine vertiefte Bewertung, Kriterien vorgeschlagen, anhand derer Stoffe mit erhöhter Besorgnis identifiziert werden können. Diese Kriterien betreffen u. a. die Einstufung im Rahmen der CLP-Verordnung, das Vorhandensein von bestimmten Eigenschaften, die im Zusammenhang mit möglichen Risiken für Mensch und Umwelt bereits bekannt sind (z. B. Persistenz oder Faserform), eine mögliche Freisetzung sowie weitere nachhaltigkeitsbezogene Aspekte.

Diskussion

Auf eine Nachfrage zur Teststrategie erläuterte Frau Haase, dass sich die Verteilung eines Wirkstoffes durch einen Carrier im Vergleich zum „reinen Wirkstoff“ im menschlichen Körper nicht verändert, wenn der Carrier den Wirkstoff sehr schnell freisetzt. Auch wenn Membranen durch den Carrier nicht durchquert werden können, ändert sich durch den Carrier die Verfügbarkeit im Körper nicht. Lediglich, wenn ein Membrandurchtritt stattfindet und die Wirkstofffreisetzung langsam erfolgt, beeinflusst der Carrier ggf. die Verteilung im Körper, was dann in einer Prüfung der Einheit „Wirkstoff und Carrier“ berücksichtigt werden muss. Da die Fähigkeit zum Membrandurchtritt und die Eigenschaften der Freisetzung aus dem Carrier ohne Tierversuche geprüft werden können, sei dieses Vorgehen aus Sicht des Tierschutzes hilfreich.

Frau Haase antwortet auf die Frage, ob in der behördenübergreifenden Arbeitsgruppe auch über eine Kategorisierung von advanced materials nachgedacht wird, dass ein „Clustern“ z. B. nach Materialtypen und nach Funktionalitäten durchaus als sinnvoll angesehen wird und dass darüber bereits gesprochen wurde. Eine Zusammenfassung in Clustern kann auch sinnvoll sein, um Risikobetrachtungen für mehrere advanced materials gemeinsam machen zu können. Sie verwies allerdings darauf, dass aber leider die Cluster oftmals keine ein-eindeutige Zuordnung aller Materialien erlaube.

10.3 Ethische Aspekte im Umgang mit aktiven, nanoskaligen Materialien etc.

Prof. Dr. Wolfgang Liebert, BOKU

Herr Liebert stellte seine Gedanken zur Übernahme von Verantwortung und zu ethischen Aspekten beim Umgang mit (aktiven) nanoskaligen Materialien vor. Er skizzierte zudem, wie ein sicherer und vorsorgeorientierter Umgang mit Nanomaterialien aussehen könnte. Dabei wandte er sich gegen die Tendenz, viele neue „Bereichsethiken“ (wie „Nanoethik“) zu formulieren. Wolfgang Liebert sieht den Kern einer Ethik vielmehr darin, übergeordnete Orientierung zur Bewertung von Entwicklungen geben zu können und nicht nur einzelne Bereiche und Aspekte zu betrachten.

Gemäß Herrn Liebert geht es darum, Verantwortung für die Folgen des Handelns – auch bereits in der Forschung – zu übernehmen. Voraussetzung ist eine antizipierende Ambivalenz Analyse: Klärung angestrebter und ungewollter Wirkungen einer Technologie, realistische Erwartungen versus Versprechungen, Wissen und Nichtwissen über miterzeugte Veränderungen und Folgen (auch durch mögliche „massenhafte“ Anwendungen), Verbleib von Substanzen im gesamten Lebenszyklus. Risikoabschätzungen seien ein Kern solcher Überlegungen. Das reiche aber nicht aus. Kosten-Nutzen-Analysen könnten zu utilitaristischen Verengungen des Blicks führen. Möglichst frühzeitige Technikfolgenabschätzung und Technikgestaltung sei erforderlich, zu der auch die Prüfung von Alternativen gehöre.

Das Vorsorgeprinzip sei eine Konkretisierung einer Ethik, die fordert, dass Entscheidungen, welche schwerwiegende oder irreversible Schäden vermeiden können, nicht dadurch verhindert werden sollen, dass wissenschaftliche Daten über die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines Schadens oder seine konkreten Ausmaße etc. fehlen. Die EU-Kommission hat das Vorsorgeprinzip im Jahr 2000 in einer Mitteilung¹⁴ in die Regulierungsgrundsätze aufgenommen.

Der Ansatz des „safe(er) by design“ versuche intrinsische Vagheiten des Vorsorgeprinzips konkreter zu fassen, da die Funktionalität und Sicherheit von Innovationen über den gesamten Entwicklungsprozess mitgedacht werden. Allerdings sei der Ansatz für die komplexe Technikentwicklung nicht ausreichend und bereits das Verständnis von „sicher“ bedürfe der Interpretation. Zudem würden andere

¹⁴ Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2000): MITTEILUNG DER KOMMISSION die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips, MITTEILUNG DER KOMMISSION die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips

wesentliche Gesichtspunkte, wie gesellschaftliche Werte und Ziele in diesem Ansatz nicht berücksichtigt.

Vor dem Hintergrund zunehmender globaler ökologischer Krisen gebe es auch Forderungen nach einer „großen Transformation“, welcher Zukunftsbilder zugrunde liegen, die weniger technologiegetrieben sind, sondern stärker den gesellschaftlichen Umgang miteinander und mit der Natur in den Fokus rücken oder einen generellen Schutz lebendiger Systeme als orientierendes Prinzip fordern.

Als Beispiel für eine „ethische Orientierung“ nannte Herr Liebert die Empfehlung der EU-Kommission eines „Code of Conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research“¹⁵, der sieben Prinzipien und weitere Leitlinien enthält. Über die ausdrückliche Orientierung am Vorsorgeprinzip hinaus benennt dieser Verhaltenskodex u. a. den Zweck von Nanoforschung (Wohlfahrt und nachhaltige Entwicklung) und fordert Transparenz und Partizipation.

Herr Liebert schloss seinen Vortrag mit einem Fazit, dass im Kontext der Forschung und des Umgangs mit Nanomaterialien „Verantwortung übernehmen“ bedeute, integrativ, interdisziplinär und transdisziplinär zu forschen und die Gesellschaft bestmöglich über Sicherheits- und ethische Aspekte zu informieren. Es müssten alle Risiken einer Technologie entlang des gesamten Lebenszyklus und global sowie mit einem langen Zeithorizont betrachtet werden. Zudem müsse anhand diskursiv geklärter gesellschaftlicher Werte und Normen auch kritisch geprüft werden, welche Forschung und welche Produkte wirklich gebraucht werden. Ethische Grundannahmen und unhinterfragte Weltbilder müssten überprüft und ggf. verändert werden.

Diskussion

An den Vortrag von Herrn Liebert schloss sich eine Diskussion über verschiedene Aspekte seiner Überlegungen an. Die folgenden Aspekte wurden von einzelnen Teilnehmenden in die Diskussion gebracht.

Ergänzend zum Vortrag wurde gesagt, dass der Ansatz des „safe by design“ nicht nur die Sicherheit betreffe, sondern auch an Nachhaltigkeit und eine sozial-ökologische Transformation angeschlossen. Die Forderung nach mehr Partizipation der Zivilgesellschaft in Entscheidungsprozessen wurde unterstützt. Allerdings wurde die

¹⁵ European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Commission recommendation on a code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research & Council conclusions on responsible nanosciences and nanotechnologies research, Publications Office, 2009, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/28456>

offene Frage gestellt, wie ausreichend Transparenz und Information über komplexe Technologien für die gesellschaftlichen Akteure ermöglicht werden können.

Es wurde darauf hingewiesen, dass sich das gesellschaftliche Wertegefüge in den letzten Monaten sehr schnell verändert habe und die Gesetzgebung hinter diesen Prozessen herhinke. Entscheidend sei, wie Bewertungsprozesse (von Technologien) implementiert würden. Zudem sollte nicht versäumt werden, anzuerkennen, was bereits erreicht worden ist, z. B., dass Risikobewertungen und Lebenszyklusbetrachtungen Voraussetzungen für die Bewilligung von Fördermitteln in EU-Forschungsprogrammen sind.

Zum Code of Conduct der EU-Kommission wurde ergänzt, dass dieser gemeinsam von der Industrie, einer Bank und den Regulatoren erarbeitet wurde. Die verbindliche Umsetzung sei jedoch daran gescheitert, dass die Implementierung der Prinzipien und Leitlinien für nicht kontrollierbar gehalten wurde (kein Monitoring). Somit wurde entschieden, dass der Verhaltenskodex nicht verpflichtend vorgeschrieben werden kann.

Auf den Hinweis, dass die Forschenden selbst auch darüber entscheiden würden, welche Projekte und Arbeiten sie durchführen und für sinnvoll halten, wandte Herr Liebert ein, dass die einzelnen Forschenden nicht überfordert werden dürften. Das aktuelle System der Bewertung von Forschungsleistungen hielte nicht dazu an, ethische Überlegungen in Forschungsentscheidungen einfließen zu lassen und kollektives Lernen über die möglichen Folgen von Innovationen zu fördern. Zudem sei die Bewertung der Folgen einer Innovation für einzelne nicht (mehr) möglich, da diese zu komplex und vernetzt sind. Daher sei es wichtig, diese Bewertungen nicht den einzelnen zu überlassen.

In einer weiteren Wortmeldung wurde bekräftigt, dass der Begriff „sicher“ unterschiedlich interpretiert wird und der Anwendungskontext jeweils zu berücksichtigen sei. Generell würde in Deutschland eher zurückhaltend auf Innovationen reagiert, was darauf zurückgeführt wurde, dass das Eintreten negativer Auswirkungen einer Technologie für wahrscheinlicher oder maßgeblicher gehalten werde als der erwartete Nutzen.

Die Aussagen von Herrn Liebert, die die ethische Perspektive auf Basis der Zukunft des Planeten insgesamt ausweitete, wurden in einem Beitrag als nicht hilfreich angesehen. Es müsse auch möglich sein, einzelne Aspekte einer Entwicklung betrachten und bewerten zu können.

Ein weiterer Beitrag beschäftigte sich mit der Frage, ob es wichtig ist, bereits in der Ausbildung viele Aspekte der Ethik und Folgenabschätzung zu behandeln, damit es überhaupt möglich ist, Wissen und Nicht-Wissen zu erkennen. Hier bestünden Defizite, die behoben werden müssten, um zukünftig besser bewerten und

entscheiden zu können. Es sei zu beobachten, dass Lehrstühle für Toxikologie zugunsten von Lehrstühlen für Pharmakologie aufgegeben würden. Dies wurde als ungünstig bezeichnet.

Es wurde des Weiteren gemahnt, dass es ein Trugschluss sei, dass die nun bereits länger andauernde Forschung zur Nanosicherheit alle Fragen bereits geklärt habe. Dies sei keineswegs der Fall und die Arbeit müsse fortgesetzt werden, um eine angemessene Regulierung und einen verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien sicherzustellen.

11 Zusammenfassung

Beim FachDialog „Chancen und Risiken aktiver, nanoskaliger Materialien“ wurde ein Überblick über diese Materialien gegeben. Verschiedene mögliche Anwendungsbereiche wurden vorgestellt. Vorträge über die rechtliche Situation und ethische Überlegungen rundeten die Veranstaltung ab.

Aktive, nanoskalige Materialien können viele verschiedene Funktionen ausführen. Dabei werden Funktionen aus der Makroebene auf die Nanoebene übertragen, aber durchaus auch Eigenschaften des Nanobereichs, wie beispielsweise die Plasmonresonanz genutzt. Die vorgestellten aktiven, nanoskaligen Materialien können auf äußere Reize reagieren und sich während ihrer Anwendung in ihrem Energiezustand, ihrer Zusammensetzung oder ihrer Struktur verändern. Sie können aus organischen oder anorganischen Verbindungen bestehen oder auch aus einer Kombination beider angefertigt sein (Hybride). In vielen Bereichen werden Polymere, wie z. B. DNA eingesetzt, um nanoskalige Strukturen zu erzeugen.

Es gibt keine eindeutige Definition für aktive, nanoskalige Materialien. Der Vorschlag von Camboni et al.¹⁶ erschien einigen Teilnehmenden zwar als hilfreich, wurde aber wegen möglicher Grenzfälle auch kritisiert.

Derzeit scheinen aktive, nanoskalige Materialien überwiegend in und für die Medizin entwickelt zu werden. Nanocarrier sind bereits lange im Einsatz und dienen dazu, pharmakologische Wirkstoffe stabilisiert und/oder gezielt(er) an ihren Wirkort zu bringen. Zudem scheinen aktive, nanoskalige Materialien sich gut als Sensoren zu

¹⁶ Camboni et al. (2019) A State of Play Study of the market for so called "Next Generation" Nanomaterials. European Chemicals Agency, Ref.-No. ECHA-2019-R-14-EN, ISBN: 978-92-9020-726-9, DOI: 10.2823/242422, Seite 25-26. Sinngemäß werden passive Nanomaterialien, Nanostrukturen und nanostrukturierte Materialien dadurch von aktiven unterschieden, dass erstere sich in einem thermodynamisch metastabilen Zustand befinden und Änderungen des Zustandes nicht beabsichtigt sind. Letztere werden als (re-)aktive Nanomaterialien, Nanostrukturen und nanostrukturierte Materialien bezeichnet, die stimuli-responsiv sind und während der Verwendung Energie absorbieren, empfangen, oder emittieren und sie in Aktivitäten, die keine Gleichgewichtszustände herstellen, umwandeln und die oft, aber nicht immer mit Bewegung, Wachstum oder Vermehrung in Verbindung stehen.

eigenen. Beim FachDialog wurden verschiedene Detektionsprinzipien vorgestellt, die auf der Aktivität nanoskaliger Materialien beruhen.

Für die meisten vorgestellten Anwendungen befinden sich die Materialien noch im Forschungs- bzw. im Entwicklungsstadium und sind noch nicht im Markt angelangt.

Die Chancen der Anwendung aktiver, nanoskaliger Materialien liegen einerseits in einer Effizienzsteigerung und/oder Kostenminderungen für bestimmte Verfahren: Nanocarrier können zu höheren Wirkstoffkonzentrationen an den Wirkorten führen, Krankheiten können schneller diagnostiziert werden, Bauteile können einfacher gefertigt und Materialien eingespart werden. Es ist möglich, präziser zu werden, z. B. bei Dosierpumpen, die auf künstlichen Muskeln beruhen, oder mehrere Funktionen in einem Material zu vereinen, wie das Beispiel der Strukturbatterie zeigte. Insbesondere im medizinischen Bereich werden zudem gänzlich neue Qualitäten erreicht, z. B. können durch die „Verpackung“ in Carriern auch solche Wirkstoffe eingesetzt werden, die sonst im Körper abgebaut würden. Allerdings ist über mögliche Risiken dieser Carrier bisher wenig bekannt.

Weitere Chancen der Anwendung aktiver, nanoskaliger Materialien bestehen in verringerten Nebenwirkungen von Medikamenten, dem möglichen Ersatz toxischer Schwermetalle, der Verlängerung der Lebensdauer von Materialien und der damit verbundenen Verringerungen des Ressourcenverbrauches sowie einer erhöhten Sicherheit durch die Möglichkeit, die Belastung von Materialien kontinuierlich mit Sensoren zu überwachen.

Die Risiken der Anwendung aktiver, nanoskaliger Materialien sind eng daran geknüpft, aus welchen Bausteinen sie bestehen. Einige CNTs sind karzinogen, Wolframoxid wird als genotoxisch angesehen. Phthalocyanine unterliegen teilweise einer Beschränkung in Tätowierfarben aufgrund von sensibilisierenden und weiteren gefährlichen Eigenschaften.

In einigen Anwendungen werden seltene Rohstoffe verwendet; so zum Beispiel Indiumphosphid als Quantum Dots, das nach der Anwendung nicht wiedergewonnen werden kann. Materialien, die aus mehreren Bestandteilen bestehen und/oder sehr komplex sind, könnten zukünftig die Abfallbehandlung stören oder ein Recycling erschweren. Hier wurden karbonverstärkte Rotorblätter von Windrädern als Beispiel genannt, für welche derzeit kein angemessenes Abfallbehandlungsverfahren verfügbar ist.

Viele der verwendeten Materialien organischen Ursprungs, z. B. DNA, werden als risikoarm gewertet, da Abbaumechanismen im Körper und in der Umwelt existieren. Allerdings ist unklar, ob sich durch die Überstruktur der Materialien das Verhalten bzw. der Abbau in Mensch und Umwelt verändert. Über das Vorhandensein

schädlicher Eigenschaften der synthetischen Polymere wurden beim FachDialog nicht berichtet.

Die bestehende Chemikaliengesetzgebung ist grundsätzlich geeignet, auch aktive, nanoskalige Materialien so zu regulieren, dass sie sicher verwendet werden. Allerdings ist hierfür zentral, dass Informationen über die (gefährlichen) Eigenschaften der Materialien bekannt sind. Dies erfordert entsprechende Pflichten für die Hersteller der Materialien sowie anwendbare Testmethoden. Derzeit sind Polymere, die vielfach auch als nanoskalige, aktive Materialien eingesetzt werden, nicht registrierungspflichtig unter REACH und viele etablierte Testverfahren sind für Nanomaterialien und aktive, nanoskalige Materialien nicht anwendbar. Somit kann derzeit nicht sichergestellt werden, dass Risiken erkannt und reguliert werden können. Zudem ist unklar, ob es angemessene Leitlinien zur Risikobewertung gibt. In der Gesetzgebung zu Kosmetika, neuartigen Lebensmitteln, Bioziden und Pflanzenschutzmitteln sind derzeit zwar Regelungen zu Nanomaterialien aufgeführt. Konkrete Vorgaben, wie die Risiken von Nanocarriern zu bewerten wären, fehlen jedoch.

Die ethische Bewertung der Anwendung von aktiven, nanoskaligen Materialien ist komplex. Die Ermittlung möglicher Risiken und Abwägungen mit erwarteten Nutzen ist aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen der Technologien mit verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen und den sich derzeit schnell wandelnden Werten eine Aufgabe, die lediglich gemeinschaftlich zu bewältigen ist.

Der FachDialog hat ein Schlaglicht auf aktive, nanoskalige Materialien geworfen und den Teilnehmenden Einblick in die Erforschung ihrer Anwendung in verschiedenen Bereichen gegeben.