

**NanoDialog**  
der Bundesregierung

# **Chancen und Risiken aktiver, nanoskaliger Materialien**

Eine Einführung für Interessierte

Bericht



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

Impressum

ÖKOPOL GmbH  
Institut für Ökologie und Politik

Nernstweg 32–34  
D – 22765 Hamburg

[www.oekopol.de](http://www.oekopol.de)  
[info@oekopol.de](mailto:info@oekopol.de)

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

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Was sind aktive, nanoskalige Materialien?</b> .....	<b>5</b>
2.1	Nanoskaligkeit .....	5
2.2	Aktivität .....	6
<b>3</b>	<b>Beispiele für Anwendungen aktiver, nanoskaliger Materialien</b> .....	<b>8</b>
3.1	Nanocarrier – Transport von Wirkstoffen.....	8
3.2	Quantum Dots – Umwandlung von Licht.....	10
3.3	Elektroaktive Polymere - künstliche Muskeln .....	13
3.4	Weitere Beispiele aktiver, nanoskaliger Materialien .....	15
3.4.1	Photoaktive, nanoskalige Materialien .....	15
3.4.2	DNA und RNA – besondere Baustoffe für aktive, nanoskalige Materialien.....	16
<b>4</b>	<b>Sind aktive, nanoskalige Materialien reguliert?</b> .....	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Referenzen</b> .....	<b>20</b>

## 1 Einleitung

Dieser Bericht richtet sich an Personen, die wissen möchten, welche Chancen und Risiken die Anwendung, aktiver, nanoskaliger Materialien bergen könnten. Zunächst wird beschrieben, was in diesem Bericht unter aktiven, nanoskaligen Materialien verstanden wird. Danach werden verschiedene mögliche Anwendungsfelder dieser Materialien beispielhaft vorgestellt und der mögliche (zukünftige) Nutzen durch aktive, nanoskalige Materialien im Vergleich zu herkömmlichen Materialien und Technologien diskutiert. Zudem wird vorgestellt, was über die möglichen Risiken bekannt ist. In Kapitel 4 werden die gesetzlichen Anforderungen an diese Materialien beschrieben.

Die Forschung zu aktiven, nanoskaligen Materialien ist ausgesprochen vielfältig. Das liegt unter anderem daran, dass unter dieser Überschrift viele, unterschiedliche Materialien und Funktionalitäten zusammengefasst werden. Diese können wiederum in vielen verschiedenen Anwendungsbereichen und Produkten eingesetzt werden. Da aktive, nanoskalige Materialien das Potenzial haben, wesentliche Technologiefortschritte zu ermöglichen, ist das Feld für Forscher\*innen sehr attraktiv und von einer hohen Dynamik gekennzeichnet. Aufgrund dieser Vielfalt und Dynamik kann dieser Bericht weder umfassend sein noch den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung im Detail wiedergeben. Stattdessen soll er einen allgemeinen Einblick in das Forschungsfeld geben.

Der Bericht basiert auf den Vorträgen und Diskussionen eines zweitägigen Stakeholderdialogs, in dem Vertreter\*innen aus Behörden, Wissenschaft und zivilgesellschaftlichen Organisationen über Chancen und Risiken aktiver, nanoskaliger Materialien diskutiert haben. Der FachDialog „Chancen und Risiken aktiver, nanoskaliger Materialien“ wurde vom Ministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und

Verbraucherschutz im Rahmen des NanoDialogs der Bundesregierung im Juni 2022 ausgerichtet. Eine Dokumentation dieser Veranstaltung ist auf [Deutsch](#) und auf [Englisch](#) verfügbar.

Das BMUV startete den NanoDialog mit der Gründung der Nano-Kommission im Jahr 2006, als die Anwendung von Nanomaterialien und -technologien kontinuierlich zunahm, (noch) relativ wenig über mögliche Risiken für Mensch und Umwelt bekannt und die Regulierung nicht an die Besonderheiten von Nanomaterialien angepasst war. Ziel der Nano-Kommission war es, die Einführung dieser Technologie durch einen kontinuierlichen Dialog der Stakeholder aus Industrie, Behörden, Wissenschaft und zivilgesellschaftlichen Organisationen zu begleiten und Prinzipien für einen verantwortlichen Umgang mit Nanomaterialien zu erarbeiten. Die NanoKommission beendete ihre Arbeit im Jahr 2010. Seit 2011 wird der Dialog in Form 2-tägiger FachDialoge weitergeführt. Auf der [Internetseite](#) des BMUV sind Berichte der NanoKommission, Zusammenfassungen der FachDialoge sowie Berichte zu den Themen der FachDialoge verfügbar.

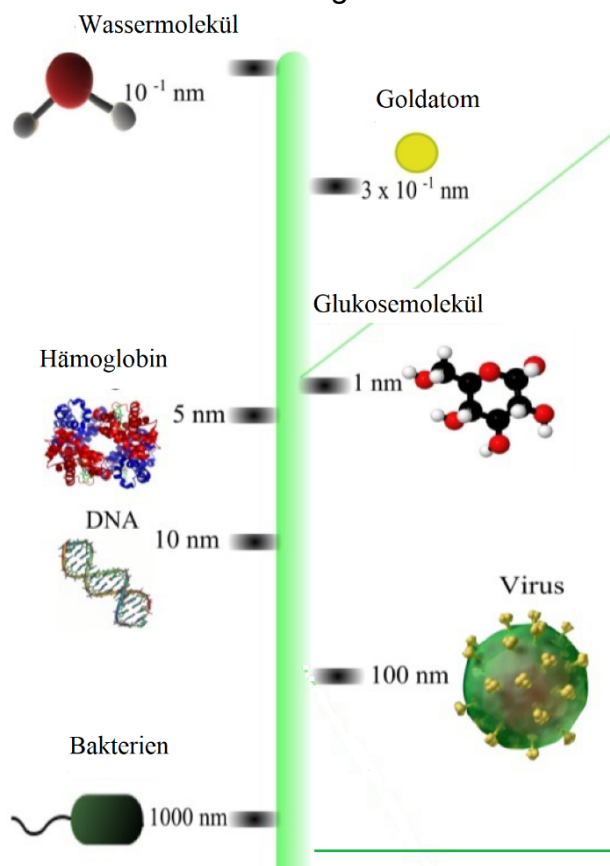
## 2 Was sind aktive, nanoskalige Materialien?

### 2.1 Nanoskaligkeit

In diesem Bericht werden Materialien als aktive, nanoskalige Materialien bezeichnet, die in mindestens **einer Dimension** (Länge, Höhe, Breite) **kleiner als 1000 Nanometer** (nm) sind. Ein „Material“ kann bestehen aus:

- einer Einzelsubstanz (Elemente), z. B. Aluminium oder Graphen
- Verbindungen mehrerer Einzelsubstanzen, z. B. Titandioxid oder
- einer Mischung von Einzelsubstanzen und Verbindungen, z. B. Kunststoff.

Ein Nanometer ist so lang wie ein Milliardstel Meter. 1000 nm entsprechen also einem



1 Mikrometer. Abbildung 1 vergleicht die Größe einiger Objekte in verschiedenen Größenbereichen. Die dünnen, diagonalen, grünen Linien markieren den nanoskaligen Bereich.

Nanoskalige Materialien können andere Eigenschaften haben als die größeren Formen desselben Materials („Nanoeffekte“). Zum Beispiel unterscheidet sich die Farbe von Goldpartikeln in verschiedenen Nanogrößen. Die im Verhältnis zum Volumen große Oberfläche nanoskaliger Materialien kann zu einer höheren Reaktivität oder der Veränderung anderer Eigenschaften dieser Materialien führen, z. B. der Wasserlöslichkeit. Nanoskalige Materialien können biegsam sein, während ihre „großen“ Formen starr sind (z. B. Nanokeramiken).

Abbildung 1: Größenvergleich Nanometer; Quelle: Wikimedia (creative commons) <https://www.mdpi.com/1422-0067/15/5/7158>, verändert Ökopol

Die EU-Kommission definiert in ihrer [Empfehlung](#), dass ein „Nanomaterial“ aus Partikeln besteht, die eigenständig oder in sog. Aggregaten oder Agglomeraten<sup>1</sup> vorliegen, wobei die Größe von mehr als 50 % der Partikel in einer Dimension zwischen 1 nm und 100 nm liegt<sup>2</sup>. Nanomaterialien sind also eine Teilmenge der nanoskaligen Materialien. Eine rechtliche Definition muss eindeutig sein, während aus wissenschaftlicher Sicht auch andere Abmessungen die Grenze zu einem Nanomaterial bilden könnten, da „Nanoeffekte“ auch bei größeren Partikeln auftreten können.

In diesem Bericht werden unterschiedliche Materialien vorgestellt, die nanoskalig sind. Einige davon erfüllen auch die EU-Definition eines Nanomaterials.

## 2.2 Aktivität

Unter „aktiven“ Materialien werden in diesem Bericht Materialien verstanden<sup>3</sup>, die aus nanoskaligen „Bausteinen“ (Einzelsubstanzen und/oder Verbindungen) bestehen und auf äußere Reize reagieren, indem sie Energie aufnehmen, umwandeln und/oder wieder abgeben. Während dieser Aktivität verändert sich das Energieniveau, die Anordnung oder die Struktur des aktiven, nanoskaligen Materials.

Die eine Aktivität auslösenden externen Bedingungen können in chemische und physikalische Reize unterteilt werden. Zu den chemischen Reizen gehören z. B. Metallmoleküle, biologische Moleküle (Proteine, Enzyme) oder organische Lösemittel. Zu den physikalischen Reizen gehören u. a. Licht, Strom, Magnetfelder oder die Temperatur. Über das Vorhandensein oder Fehlen der externen, eine Aktivität auslösenden Umgebungsbedingung kann gesteuert werden, ob ein aktives, nanoskaliges Material seine Funktion ausführt oder nicht (Schalter für die Aktivität).

In den folgenden Abbildungen ist schematisch dargestellt, welche Arten von Aktivität bzw. Mechanismen vorkommen können. Auf der linken Seite der Abbildungen stehen die Reize, die auf ein Material einwirken; das aktive, nanoskalige Material ist in „Zustand 1“ (grau). Dann beginnt die Aktivität, bei der Energie entweder aus dem Reiz oder aus anderen Quellen der Umgebung aufgenommen und umgewandelt wird. Das Material nimmt den 2. Zustand an (lila, rechter Teil der Abbildungen). Bei einigen Materialien findet keine Rückkehr in den Zustand 1 statt.

---

<sup>1</sup> Da Nanopartikel oft sehr reaktiv sind, neigen sie dazu, sich zusammen zu lagern. Wenn die Verbindung zwischen den Partikeln fest ist, spricht man von Aggregaten, bei eher locker miteinander verbundenen Partikeln von Agglomeraten.

<sup>2</sup> Für stäbchen- und plättchenförmige Partikel gibt es weitere Bedingungen bzw. Ausnahmen in dieser Definition.

<sup>3</sup> Diese Beschreibung lehnt sich an den Vorschlag einer Definition für Nanomaterialien der sog. „2. Generation“ aus einer Studie für das Europäische Observatorium für Nanomaterialien ab: Camboni et al. (2019): A state of play study of the market for so called “next generation” nanomaterials. Helsinki. <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/1b84728b-f6e1-11e9-8c1f-01aa75ed71a1/language-en>

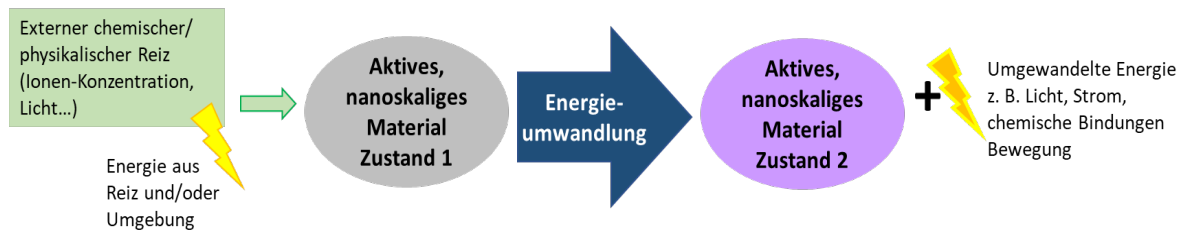


Abbildung 2: Aktivität nanoskaliger Materialien: Variante 1: keine Rückkehr in den Ausgangszustand. Beispiel: Nanocarrier, der einen Wirkstoff abgibt. Quelle: Eigene Abbildung

Andere Materialien „verbrauchen“ sich durch die Aktivität nicht, sondern können in den ersten Zustand zurückkehren; dies kann ohne weiteren Reiz (Energie) unter Abgabe der zuvor aufgenommenen Energie geschehen (Variante 2, Abbildung 3) oder einen erneuten Reiz (Energie) erfordern (Variante 3, Abbildung 4).

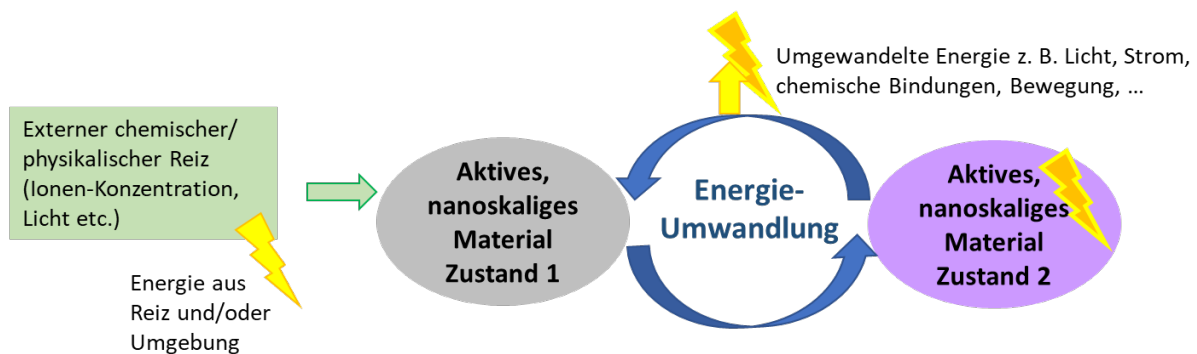


Abbildung 3: Aktivität nanoskaliger Materialien: Variante 2: Rückkehr in Ausgangszustand durch Energieabgabe. Beispiel: Quantum Dots. Quelle: Eigene Abbildung

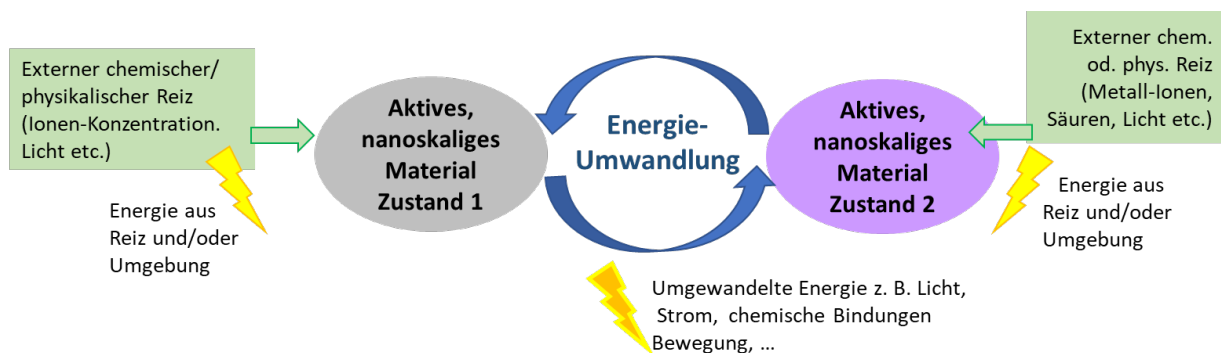


Abbildung 4: Aktivität nanoskaliger Materialien: Variante 3: Rückkehr in den Ausgangszustand durch weiteren Reiz/Energie oder Beendigung des Reizes. Beispiel: künstliche Muskeln. Quelle: Eigene Abbildung

### 3 Beispiele für Anwendungen aktiver, nanoskaliger Materialien

Es gibt viele verschiedene aktive, nanoskalige Materialien mit unterschiedlichen Funktionen, die hier nicht alle beschrieben werden können. Im Folgenden werden beispielhaft unterschiedliche Aktivitäten sowie Aspekte potenzieller Nutzen und Risiken, die mit den Materialien und/oder der jeweiligen Anwendung verbunden sein können, illustriert. Einige Materialien sind bereits in Produkten auf dem Markt, während andere noch erforscht bzw. entwickelt werden.

#### 3.1 Nanocarrier – Transport von Wirkstoffen

Nanocarrier sind im weitesten Sinne „Verpackungen“ für (Arzneimittel-)Wirkstoffe. Sie können „Transportkisten“ gleichen, die einen Wirkstoff umhüllen, oder einem Gerüst, an das ein Wirkstoff befestigt werden kann. Sind die Nanocarrier an ihrem Zielort angekommen, öffnen oder verändern sie sich auf einen externen Reiz hin und geben den Wirkstoff frei (targeted delivery). Abbildung 5 zeigt eine Art von Nanocarrier, die sich „Liposom“ nennt, da die Außenhülle aus einer Lipidschicht besteht.

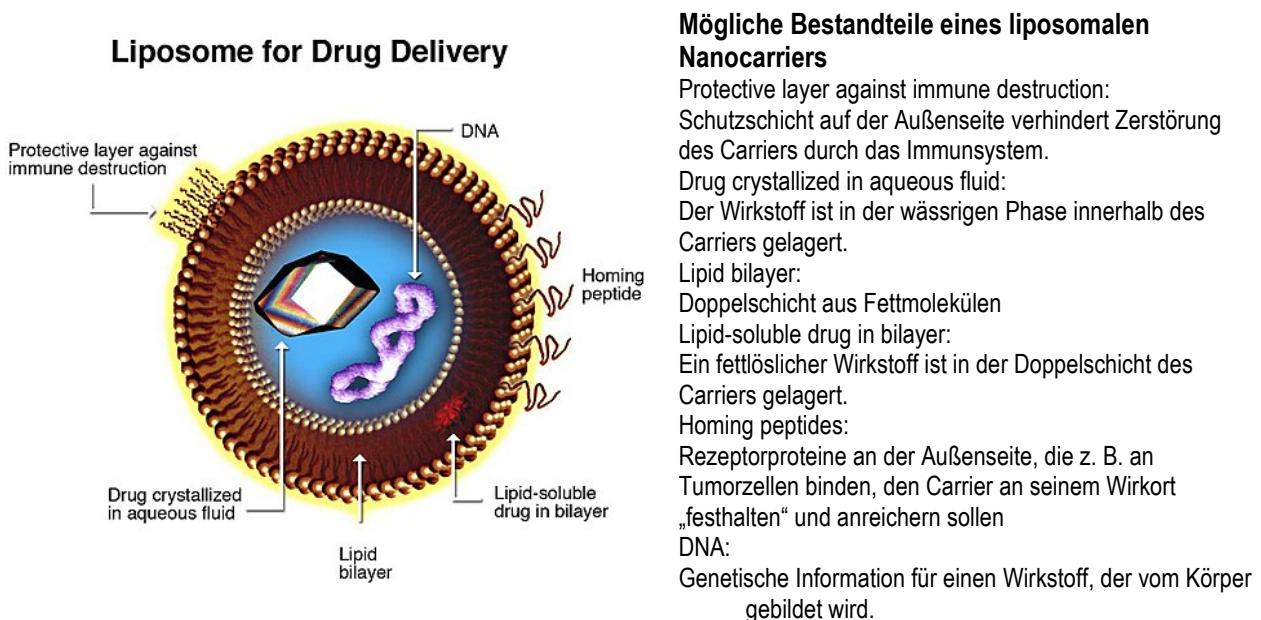


Abbildung 5: Aufbau eines Liposoms für den Wirkstofftransport.

Quelle: Wikimedia (creative commons) <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Liposome.jpg>

Die Aktivität von Nanocarriern besteht in einer Strukturveränderung, die zur Auflösung des Carriers und dadurch zur Freigabe des Wirkstoffes führt. Diese Aktivität kann durch verschiedene Reize ausgelöst werden, z. B. Änderungen des pH-Wertes, das Binden der Rezeptorproteine oder Enzyme. Nachdem der Wirkstoff freigesetzt wird, bleibt der Carrier „leer“ zurück und kann nicht noch einmal verwendet werden.



Nanocarrier können unterschiedliche Funktionen (gleichzeitig) erfüllen, insbesondere:

- Zum Schutz des Wirkstoffes, damit er im Körper nicht zerfällt oder abgebaut wird, bevor er wirken kann, wird der Wirkstoff verpackt.
- Gezielte Lieferung von Wirkstoffen (targeted delivery): Nanocarrier bewegen sich nicht aktiv, sondern werden vom Blut an den Zielzellen „vorbeigespült“. Kommen die Rezeptoren des Nanocarriers in Kontakt mit den Zielzellen, so binden sie an die Zellen und reichern den Nanocarrier (und den Wirkstoff) im Gewebe an.
- Lieferung in die Zelle: Zur gezielten Lieferung des Wirkstoffes kann es auch gehören, dass ein Nanocarrier ein Arzneimittel durch eine Zellmembran hindurchschleust. Diesen Membrandurchtritt können Nanocarrier auf unterschiedliche Weise bewerkstelligen.
- Dosierung des Wirkstoffes: je nach Nanocarrier und aktivierendem Reiz, kann gesteuert werden, wann und wie schnell ein Wirkstoff freigesetzt wird.

## Nutzen

Nanocarrier können die Effizienz erhöhen, mit der ein (Arzneimittel-)Wirkstoff an seinen Zielort im Körper gelangt (Verfügbarkeit). Dadurch kann die Menge der verabreichten Medikamente verringert werden. Infolgedessen verringert sich auch der Umwelteintrag von Arzneimitteln, die nicht vom Körper aufgenommen, sondern ausgeschieden werden. Zudem kann es sein, dass durch die geringere Dosierung unerwünschte Nebenwirkungen seltener auftreten oder weniger gravierend sind. Müssen Medikamente seltener eingenommen werden, kann das auch dazu beitragen, dass Patient\*innen sie bereitwilliger nehmen (erhöhte Compliance).

Da Nanocarrier vor Abbau schützen, ermöglichen sie den Einsatz gänzlich neuer Wirkstoffe, die ohne „Verpackung“ zerstört würden, bevor sie ihre Wirkung entfalten könnten. Ein bekanntes Beispiel hierfür sind die mRNA<sup>4</sup>-Impfstoffe gegen das Coronavirus.

Nanocarrier werden auch z. B. in Biozidprodukten, Pflanzenschutzmitteln und Kosmetika genutzt. In kosmetischen Produkten wirken die Nanocarrier ebenfalls auf oder am menschlichen Körper. Die Zielorte von Biozidprodukten und Pflanzenschutzmitteln sind hingegen Tiere, Bakterien und Pilze sowie Pflanzen und Algen. Diese Produkte werden oftmals „umweltoffen“ angewendet, das heißt die Nanocarrier gelangen direkt in die Umwelt. Die Funktionsweise der Nanocarrier unterscheidet sich

---

<sup>4</sup> Messenger RNA sind chemische Moleküle die Baupläne für Proteine von der DNA abschreiben und in der Zelle an die Orte transportieren, wo die Proteine zusammengesetzt werden. Sie unterliegen einem ständigen Auf- und Abbau in der Zelle.

in diesen Produkten nicht von denen in Arzneimitteln.

## **Risiken**

Durch den steigenden Einsatz von Nanocarriern ist die Wahrscheinlichkeit, dass Menschen mit ihnen in Kontakt kommen, grundsätzlich erhöht. Zudem ist mit steigenden Einträgen von Nanocarriern in die Umwelt zu rechnen, besonders durch Biozidprodukte und Pflanzenschutzmittel. Insgesamt steigt also die Herstellungs- und Verwendungsmenge sowie die Menge der in die Umwelt freigesetzten Nanocarrier (steigende Exposition).

Über mögliche Umwelt- und Gesundheitsrisiken des Einsatzes von Nanocarriern in der Medizin<sup>5</sup> und anderen Produkten ist derzeit noch wenig bekannt. In der Medizin werden vor allem Liposomen als Nanocarrier verwendet. Ihre Bausteine (in der Regel Fette, Proteine und DNA) kommen in allen lebenden Organismen vor. Daher geht man davon aus, dass die (Bestandteile der) Nanocarrier durch natürliche Mechanismen abgebaut werden. Allerdings ist bisher nicht ausreichend bekannt, ob dies uneingeschränkt für alle Formen von liposomalen Nanocarriern gilt, oder ob bestimmte Strukturen einem Abbau nicht zugänglich sind.

Generell können Nanocarrier aus einer ganzen Reihe unterschiedlicher Substanzen bzw. Strukturen bestehen, wie natürlichen und künstlichen Polymeren, Proteinen, Viren aber auch anorganischen Strukturen wie Siliziumdioxid oder Metallen wie Gold, Silber oder Eisen. Die Frage ihrer Stabilität in der Umwelt ist ein zentraler Aspekt der Risikoabschätzung. Wenn sie bioabbaubar sind oder den natürlicherweise vorkommenden Substanzen gleichen, kann von einem eher geringen Risiko ausgegangen werden.

## **3.2 Quantum Dots – Umwandlung von Licht**

Quantum Dots sind 1 bis 10 nm große Partikel, die meistens aus Halbleitermaterialien bestehen, z. B. Silizium oder Cadmiumselenid. Sie können aus mehreren Schichten bestehen (wie eine „Zwiebel“ aus Kern und Schalen). Ihre besonderen und beeinflussbaren optischen und elektronischen Eigenschaften entstehen durch Quanteneffekte, die bei nanoskaligen, aber nicht bei größeren Formen der Materialien auftreten.

---

<sup>5</sup> Medikamente müssen vor der Vermarktung zugelassen werden. Im Rahmen der Prüfungen werden die Nutzen und Risiken der Arzneimittel überprüft. Daher ist davon auszugehen, dass für Nanocarrier in jedem Fall bei den im Markt befindlichen Medikamenten der Nutzen die möglichen Risiken übersteigt.

Quantum Dots nehmen Energie auf und geben sie verändert wieder ab. Abbildung 6

zeigt den Mechanismus für die Erzeugung von Licht einer bestimmten Farbe, z. B. für Displays: Das Licht regt die Elektronen im Halbleitermaterial des Quantum Dots an (Reiz). Aufgrund von Quanteneffekten kann die aufgenommene Energie nur in bestimmten „Portionen“, also einer bestimmten Wellenlänge (hier: Lichtfarbe) abgegeben werden.

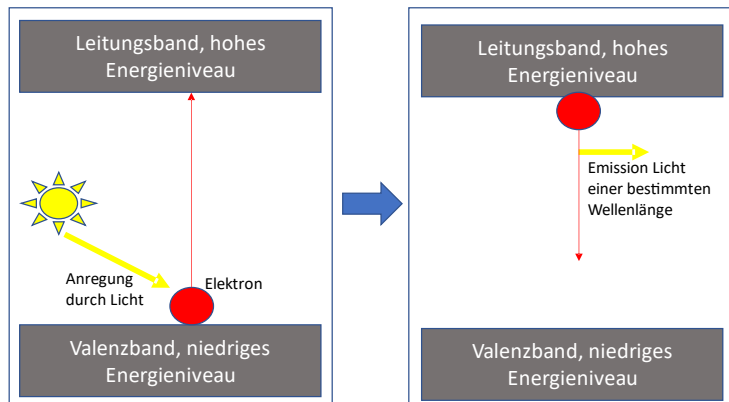


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der Aktivität von Quantum Dots  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Wellenlänge der von einem Quantum Dot abgestrahlten Energie wird einerseits von der Art des Halbleitermaterials bestimmt. Andererseits – und das ist das Besondere an Quantum Dots – hängt sie für ein bestimmtes Material nur von der Partikelgröße ab. Das heißt, ein Halbleiter erzeugt z. B. als besonders kleines Quantum Dot blaues Licht, während größere Partikel des gleichen Materials grünes oder rotes Licht erzeugen. Falls Quantum Dots mit Licht angeregt werden, so ist die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts in der Regel größer, d. h. mehr zum roten Bereich des Spektrums verschoben als die des anregenden Lichts. Die Intensität der abgestrahlten Energie (z. B. die Helligkeit von Licht) hängt von der Oberfläche des Quantum Dots ab. Es kann auch Energie im Infrarot- oder UV-Bereich abgeben. Der Übergang von Elektronen als Ladungsträgern in ein hohes Energieniveau im Quantum Dot kann auch anderweitig genutzt werden, z. B. zur Stromerzeugung in Solarzellen oder in elektronischen Bauteilen (Transistoren).

## Nutzen

Die besonderen Eigenschaften von Quantum Dots, wie z. B. die schmalbandige Emission, ihre Unempfindlichkeit gegenüber Sauerstoff, Licht, Wärme und Wasser sowie die Möglichkeit, durch gezielte Synthesen die Eigenschaften der Partikel genau bestimmen bzw. gestalten zu können, macht sie für viele Einsatzbereiche interessant. Sie werden zum Beispiel bereits in Displays als „Quantum Dot Light Emitting Diodes (QLEDs)“ eingesetzt. Sie sind brillanter und länger haltbar als die (bisher oft eingesetzten) organischen LEDs (OLEDs). Viele Anwendungsmöglichkeiten sind allerdings erst in der Entwicklung, so z. B. die Nutzung in der Umwandlung von Licht in der Photovoltaik zur Erhöhung des Wirkungsgrades von Solarzellen, der Einsatz als Leuchtstoffe oder in sog. Quantencomputern.

Quantum Dots können in vielen Bereichen sowohl eine Steigerung der Effizienz von technologischen Anwendungen erreichen sowie eine Steigerung der Qualität (bessere Bildgebung, höhere Auflösung, Nutzung neuer Wellenlängen etc.).

## Risiken

Die für Quantum Dots verwendeten Halbleitermaterialien haben teilweise toxische Eigenschaften, so ist z. B. [Galliumarsenid](#) als krebserregend und reproduktionstoxisch eingestuft. Einige Schwermetallverbindungen, z. B. solche, die Cadmium enthalten, unterliegen gesetzlichen Beschränkungen<sup>6</sup> und werden daher zunehmend durch andere, weniger toxische Materialien ersetzt.



Abbildung 7: Elektroaltgeräte, die seltene und/oder toxische Materialien enthalten können. Quelle: [Pixabay.com](#)

Schädigungen durch (öko-)toxische Materialien sind nur dann möglich, wenn Mensch und/oder Umwelt direkt mit ihnen in Kontakt kommen. Dies ist bei Quantum Dots lediglich an Arbeitsplätzen (Herstellung, Labor etc.) möglich, wo die Materialien als solche frei vorliegen. In diesen Prozessen kann es auch zu Umweltemissionen (Abluft, Abwasser, Abfall) kommen. Während der Nutzung von Produkten, also z. B. einem

Display, ist ein direkter Kontakt mit dem Quantum Dot normalerweise nicht möglich, da diese innerhalb des Gerätes gebunden sind und nicht entweichen können. Werden elektronische Produkte zu Abfall, können in den Abfallbehandlungsprozessen wieder Emissionen mit der Folge von Expositionen von Beschäftigten und der Umwelt entstehen.

Über das Verhalten von Quantum Dots fehlen verlässliche Informationen. Es wird vermutet, dass sie im Körper sowohl mobil als auch stabil sind und sich in bestimmten Regionen/Organen anreichern könnten. Es wird auch erwartet, dass zumindest der Kern der Quantum Dots in der Umwelt stabil ist, während seine äußere Hülle (coating) wahrscheinlich abgebaut wird.

---

<sup>6</sup> 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. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32011L0065>

Insgesamt ist über mögliche Umwelt- und Gesundheitsrisiken wenig bekannt.

Eine weitere Herausforderung der Verwendung von Quantum Dots in elektronischen Geräten liegt darin, dass die Materialien kaum zurückgewonnen werden können. Wenngleich elektrische und elektronische Geräte zumindest teilweise getrennt eingesammelt werden, fehlen technische Anlagen und Verfahren, um die eingesetzten Materialien, die nur in sehr geringen Anteilen vorliegen, gezielt wiederzugewinnen. Da sie teilweise sehr selten sind, sollten solche „dissipativen Verluste“ bei der Abwägung für oder gegen die Nutzung von Quantum Dots in einer bestimmten Verwendung berücksichtigt werden. Für das in Quantum Dots verwendete Element Indium wird geschätzt, dass die weltweit bekannten Vorkommen bereits in ca. 20 Jahren aufgebraucht sind<sup>7</sup>.

### 3.3 Elektroaktive Polymere - künstliche Muskeln

Elektroaktive Polymere sind nanoskalige Materialien, deren Ausmaße sich bei Anlegen einer Spannung verändern, d. h. sie können sich verlängern und verkürzen oder sich verdicken und verjüngen. Daher werden sie auch künstliche Muskeln genannt. Die mechanische Veränderung der Polymere (Aktivität) wird durch eine elektrische Spannung angeregt (Reiz). Abbildung 8 zeigt schematisch den Aufbau und die Funktion eines aus elektroaktiven Polymeren bestehenden Greifers.

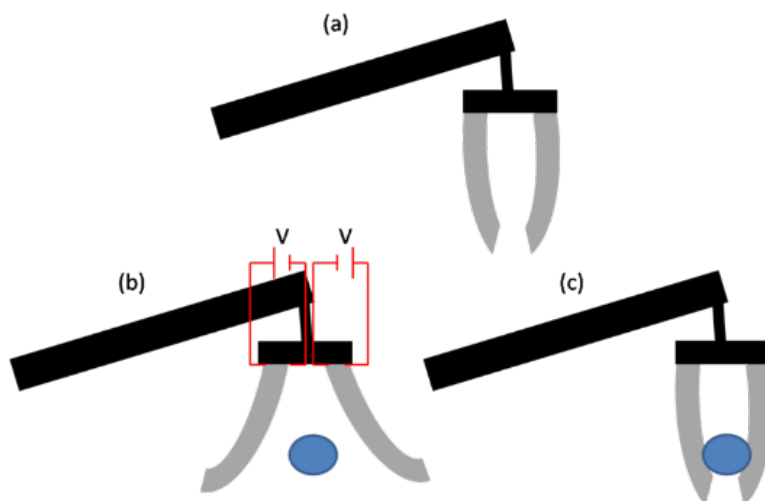


Abbildung 8: a) Greifwerkzeug, b) Elektrische Spannung führt zum Öffnen der Finger. c) Ohne Spannung kehren die Finger in Ausgangsposition zurück.  
Quelle: Wikimedia <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EAP-example2.png>

Es wird an unterschiedlichen Arten künstlicher Muskeln geforscht, deren Grundbestandteil Ketten aus Kohlenstoffverbindungen sind (Polymere), an die weitere Verbindungen oder Substanzen befestigt sein können, die die Funktionalität beeinflussen. Der Mechanismus, wie die Bewegung zustande kommt, kann sich je nach Polymer und Gesamtaufbau des künstlichen Muskels unterscheiden.

<sup>7</sup> <https://institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/indium>

## **Nutzen**

Vom Einsatz künstlicher Muskeln im menschlichen Körper ist die Forschung noch weit entfernt. Mögliche zukünftige Anwendungen wären z. B. Netzhautimplantate oder künstliche Organe, die durch additive Fertigungstechnologien (3D-Druck) hergestellt werden könnten.

Künstliche Muskeln werden aber bereits in Medizinprodukten angewendet. So finden sie z. B. als Pumpen Verwendung, die eine sehr genaue Dosierung von Medikamenten erlauben. In der Erprobung sind Verbandsmaterialien und Filterpapiere, die künstliche Muskeln enthalten. In den nächsten Jahren ist mit der Entwicklung kontrahierbarer, medizinischer Nähte zu rechnen sowie dem Einsatz künstlicher Muskeln in der Endoskopie oder in chirurgischen Instrumenten.

Außerhalb der Medizin werden künstliche Muskeln in der Robotik verwendet. Hier ersetzen sie konventionelle Greifer und ermöglichen es, dass Menschen und Maschinen näher zusammenarbeiten, da die Verletzungsgefahr bei den „weichen Muskeln“ im Gegensatz zu den „harten, metallischen“ Roboterteilen deutlich verringert wird.

In einer umgekehrten Funktionalität, also wenn mechanische Energie (Verformung) in elektrische Impulse umgewandelt wird, können künstliche Muskeln auch als Drucksensoren eingesetzt werden.

## **Risiken**

Derzeit ist über die Toxizität der elektroaktiven Polymere nicht viel bekannt, es ist aber davon auszugehen, dass einige von ihnen umwelt- oder gesundheitsgefährdend sind. Werden künstliche Muskeln im oder am menschlichen Körper eingesetzt, so sind Abwehrreaktionen des Immunsystems denkbar. Es wird eine hohe Stabilität der elektroaktiven Polymere in lebendigen Systemen vermutet, was auf eine geringe Interaktion (und damit Schädigung) der Umwelt hindeutet. Die für die Funktionalität gewünschte hohe Stabilität könnte sich allerdings als problematisch herausstellen, wenn in der Umwelt kein Abbau der Polymere stattfindet (Persistenz).

Neben den möglichen Umwelt- und Gesundheitsrisiken der Anwendung elektroaktiver Polymere, gibt es im Kontext des sog. „human enhancement“, also der „Verbesserung“ oder „Weiterentwicklung“ des menschlichen Körpers auch ethische Fragestellungen, welche die Einsatzmöglichkeiten künstlicher Muskeln betreffen.



## 3.4 Weitere Beispiele aktiver, nanoskaliger Materialien

### 3.4.1 Photoaktive, nanoskalige Materialien

Die Nutzung von Licht als Reiz und Energiequelle für nanoskalige Materialien wurde bereits im Zusammenhang mit Quantum Dots beschrieben (s. Kapitel 3.2). Ein anderer Mechanismus ist zweistufig und ermöglicht bzw. beschleunigt chemische Reaktionen (Katalyse). Photoaktive Materialien nehmen die Energie von Licht auf, wodurch sich ihre Struktur so verändert, dass sie sehr reaktiv werden, d. h. mit einer (bestimmten) anderen chemischen Verbindung reagieren „möchten“. Findet sich der passende Bindungspartner, wird die Energie „verbraucht“ oder in der anderen Verbindung aufgenommen. Das photoaktive, nanoskalige Material kehrt damit in den Ausgangszustand zurück, während die zweite Verbindung in einem veränderten, reaktionsfreudigen Zustand vorliegt. Diese Form der Aktivität ist beispielhaft für die Erzeugung reaktiven Sauerstoffs (Singulett-Sauerstoff) in Abbildung 9 dargestellt.

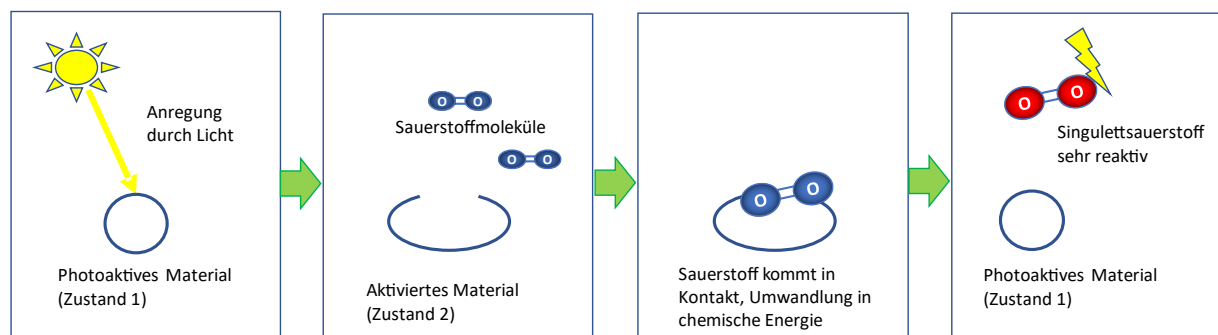


Abbildung 9: Photoaktive, nanoskalige Materialien erzeugen reaktive Sauerstoffmoleküle. Quelle: Eigene Darstellung

### Nutzen

Es wird unter anderem erforscht, wie diese Aktivität z. B. für die Desinfektion eingesetzt werden kann. Reaktiver Sauerstoff kann sowohl Viren als auch Bakterien und den sog. Biofilm, in dem diese vorkommen, zerstören. Die Bildung des reaktiven Sauerstoffs kann sowohl zeitlich als auch örtlich durch die Lichtabhängigkeit gesteuert werden.

Dieser Mechanismus könnte auch in Kläranlagen genutzt werden, um schwer abbaubares organisches Material zu zerstören. Gleichermaßen ist ein Einsatz in der Trinkwasseraufbereitung und -desinfektion denkbar.

Mit photoaktiven, nanoskaligen Materialien werden Bakterien, Viren und andere Mikroorganismen durch reaktiven Sauerstoff angegriffen. Dies zerstört schnell und „universell“ die Zellen bzw. organisches Material. Dadurch ist die Gefahr, dass sich Organismen an diesen Mechanismus gewöhnen bzw. Abwehrmechanismen ausbilden (Resistenzbildung) sehr gering.

## Risiken

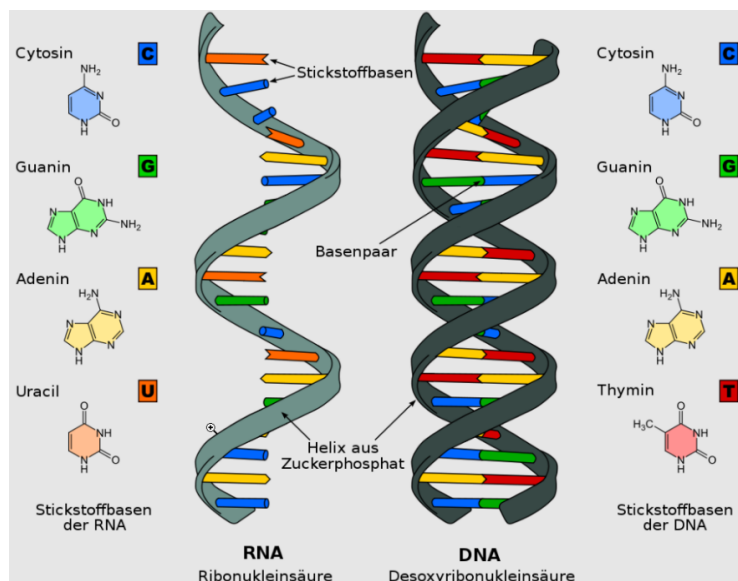
Wie auch in den vorherigen Beispielen gezeigt, können Umwelt- und Gesundheitsrisiken entstehen, wenn die verwendeten Bausteine der aktiven, nanoskaligen Materialien (öko-)toxische Eigenschaften haben. Dies ist zumindest bei einigen der Verbindungen der Fall, deren Einsatzmöglichkeiten derzeit erforscht werden. Zudem könnten neben dem gewünschten Abbau von organischen Verbindungen durch den reaktiven Sauerstoff auch neue Verbindungen entstehen, die toxische Eigenschaften haben.

### 3.4.2 DNA und RNA – besondere Baustoffe für aktive, nanoskalige Materialien

DNA- und RNA-Moleküle sind beliebte „Baustoffe“ für nanoskalige Strukturen. Das hat verschiedene Gründe, wie z. B.:

- Die Moleküle sind günstig und einfach zu beschaffen.
- Es ist möglich, die verschiedensten 3D-Strukturen in einer selbstorganisierten Reaktion herzustellen.
- DNA- und RNA können gut stabilisiert werden.
- Für diese natürlich vorkommenden Polymere existieren Abbaumechanismen.

DNA und RNA bestehen mit einer Ausnahme aus den gleichen Stickstoffbasen (s. Abbildung 10). In der Herstellung von Nanostrukturen aus DNA nutzt man, dass immer die gleichen Basen eine Bindung miteinander eingehen: Ein langer Gerüststrang (einzelsträngig) wird mit verschiedenen, kurzen und einzelsträngigen



sog. Klammersträngen vermischt. Die Klammerstränge binden an verschiedene Teile des Gerüststrangs indem sich die Basen „paaren“. Damit diese Bindung räumlich möglich ist, muss sich der Gerüststrang „falten“. So entstehen dreidimensionale Strukturen. Am Computer können die Basenabfolgen der Klammerstränge anhand der Basenabfolge des Gerüststrangs und der gewünschten Struktur

ermittelt werden.

Abbildung 10: RNA und DANN-Moleküle und ihre Bestandteile (Stickstoffbasen)  
Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Difference\\_DNA\\_RNA-DE.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Difference_DNA_RNA-DE.svg)



Auf welche Reize DNA- und RNA-Strukturen reagieren, hängt von ihrer Struktur und möglichen weiteren Molekülen ab, die mit ihnen verknüpft sein können. Ihre Aktivität besteht in der Regel in einer Veränderung ihrer Struktur, die entweder Energie freisetzt oder benötigt.

## **Nutzen**

DNA-Strukturen könnten für verschiedene Anwendungen genutzt werden, u. a. als Nanocarrier (s. Kapitel 3.1) oder Sensoren in der Diagnostik. Es wird an „Nanorobotern“ geforscht, also molekulare Werkzeuge zur Bearbeitung von Materialien, z. B. der Herstellung (anderer) Nanostrukturen. Viele weitere Verwendungen sind denkbar und teilweise in der Entwicklung.

## **Risiken**

Synthetische DNA- oder RNA-Strukturen sind keine „Gene“! Szenarien, dass sie sich selbst vermehren und die Kontrolle über den Menschen übernehmen, sind nicht realistisch. Da die Bausteine der DNA und RNA natürlich vorkommen, ist nicht mit einer Toxizität zu rechnen. Allerdings ist über das Verhalten im Körper und in der Umwelt wenig bekannt. Da die Strukturen mit dem Ziel der Stabilität hergestellt werden, sind sie mit natürlich vorkommender DNA und RNA nur bedingt vergleichbar.

## 4 Sind aktive, nanoskalige Materialien reguliert?

Aktive, nanoskalige Materialien fallen grundsätzlich unter das Chemikalienrecht und müssen daher die gleichen gesetzlichen Anforderungen erfüllen, wie andere Chemikalien auch. Allerdings legen einige Besonderheiten der Nanomaterialien nahe, dass eine Überprüfung des Rechtsrahmens notwendig ist.

Wie strikt eine Chemikalie reguliert ist, hängt davon ab, welche Eigenschaften sie hat; Je (öko-)toxischer Chemikalien sind, desto strenger sind die Anforderungen. Welche Eigenschaften mit welchen Methoden ermittelt werden, ist ebenfalls gesetzlich vorgeschrieben und hängt davon ab, in welcher Tonnage eine Chemikalie hergestellt wird.

Es ist möglich, dass bei aktiven, nanoskaligen Materialien (öko-)toxische Eigenschaften nicht geprüft werden (können) und sie somit unerkannt bleiben. Damit entfällt die sog. chemikalienrechtliche Einstufung<sup>8</sup>, welche die Voraussetzung für Anforderungen zum Risikomanagement sind. Mögliche Gründe dafür, dass Informationen für eine Einstufung fehlen, sind:

- Bei geringen Herstellungsmengen besteht keine Pflicht zum Testen und Ermitteln der gefährlichen Eigenschaften.
- Für die in aktiven Materialien verwendeten Polymere besteht derzeit keine Pflicht, die Gefährlichkeit zu ermitteln.
- Die Testverfahren sind nicht an die Besonderheiten dieser Materialien angepasst. Daher liefern sie keine verlässlichen Ergebnisse oder sind gar nicht anwendbar.
- Aktive, nanoskalige Materialien liegen in (mindestens) zwei Zuständen vor, die unterschiedliche Eigenschaften haben (können). Die bestehenden Testsysteme können dies, sowie ggf. stattfindende weitere Abbauprozesse nicht testen.

Somit ist nicht immer sichergestellt, dass die für gefährliche Chemikalien notwendigen Risikomanagementmaßnahmen für aktive, nanoskalige Materialien auch greifen. Des Weiteren fehlen Leitlinien und Vorgaben, wie die Sicherheit von Produkten, in denen aktive, nanoskalige Materialien verwendet werden, überprüft werden kann. Daher besteht ein Verbesserungs- und Anpassungsbedarf bei den Instrumenten zur Umsetzung des Chemikalienrechts.

---

<sup>8</sup> Die chemikalienrechtliche Einstufung ist ein Bewertungsprozess, bei dem Informationen zur Toxizität und Ökotoxizität von Chemikalien aus Tests mit Kriterien für verschiedene schädliche Wirkungen, wie Karzinogenität, Reproduktionstoxizität oder allergene Wirkungen, verglichen werden. Überschreiten die Testergebnisse bestimmte Schwellenwerte, wird ein Stoff für diese schädliche Wirkung „eingestuft“.

## 5 Zusammenfassung

Aktive, nanoskalige Materialien sind chemische Substanzen oder Verbindungen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 1000 nm sind. Während ihrer Anwendung nehmen sie Energie auf und wandeln sie um. Dadurch verändert sich ihre Struktur oder ihr Energiezustand. Aktive, nanoskalige Materialien können aus diversen „Bausteinen“ bestehen, die von Metallen oder Salzen bis hin zu DNA reichen.

Die Aktivität nanoskaliger Materialien wird durch einen äußeren Reiz ausgelöst, z. B. Licht oder eine elektrische Spannung. Je nach Material kann Energie in chemische Bindungen, Strahlung, Bewegung oder elektrische Energie umgewandelt werden. Oftmals ist dies umkehrbar, das heißt, die Aktivität kann immer wieder ausgeführt werden. Die Nanoskaligkeit der Materialien kann für die Funktion aus zwei Gründen entscheidend sein: a) die Aktivität beruht auf Nanoeffekten (z. B. Quantum Dots) oder b) die Funktionalität erfordert eine sehr geringe Größe (z. B. Nanocarrier).

Derzeit ist die Medizin das wichtigste Forschungs- und Anwendungsfeld für aktive, nanoskalige Materialien. Es wird in der Pharmakologie, der Diagnostik und an medizinischen Produkten geforscht. Weitere wichtige Bereiche sind die Elektronik und die Informationsverarbeitung.

Aktive, nanoskalige Materialien können bestehende Technologien effizienter machen, sie qualitativ verbessern oder gänzlich neue Technologieansätze ermöglichen. Mögliche Risiken können durch (öko-)toxische Bausteine der Materialien entstehen, falls diese in Kontakt mit Menschen oder Umwelt kommen. Zudem ist die Wiedergewinnung der Materialien aus verschiedenen Gründen schwierig, was bei Chemikalien mit geringer Verfügbarkeit problematisch sein kann.

Grundsätzlich sind aktive, nanoskalige Materialien durch die bestehenden Gesetze abgedeckt. Allerdings ist nicht (immer) sichergestellt, dass die möglicherweise (öko-)toxischen Eigenschaften von aktiven, nanoskaligen Materialien auch ermittelt werden. Hier gibt es einen Prüfungsbedarf für die Gesetzgeber.

Die Entwicklung aktiver, nanoskaliger Materialien wird in den nächsten Jahren voranschreiten. Für viele gesellschaftliche Herausforderungen scheinen aktive, nanoskalige Materialien wichtige Beiträge liefern zu können. Mehr Informationen über mögliche Risiken sind notwendig, um sicherzustellen, dass nur solche aktiven, nanoskaligen Materialien angewendet werden, deren Nutzen die Risiken für Mensch und Umwelt übersteigt.

## 6 Referenzen

Camboni et al. (2019): A state of play study of the market for so called “next generation” nanomaterials. Helsinki.

<https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/1b84728b-f6e1-11e9-8c1f-01aa75ed71a1/language-en>

Drapalik et al. (2020): Advanced materials – Overview of the field - Factsheets on selected classes of Advanced materials. Annexes to the final report. Umweltbundesamt.

Verfügbar unter: [https://oekopol.de/archiv/material/756\\_AdMa\\_Factsheets\\_final.pdf](https://oekopol.de/archiv/material/756_AdMa_Factsheets_final.pdf)

Empfehlung der Kommission vom 10. Juni 2022 zur Definition von Nanomaterialien (Text von Bedeutung für den EWR) 2022/C 229/0

Verfügbar unter: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614\(01\)&from=DE](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614(01)&from=DE)

Institut für seltene Erden und Metalle – Indium

<https://institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/indium/>

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

Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32011L0065>

Reihlen, A.; Giese, B.; Jepsen, D. (2022): FachDialog 6.1 – Chancen und Risiken aktiver, nanoskaliger Materialien. Dokumentation. Ministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/themen/gesundheitschemikalien/nanotechnologie/nanodialog-der-bundesregierung>

Nanopartikel.info – Thema Quantenpunkte (Stand August 2022)

<https://nanopartikel.info/wissen/materialien/quantenpunkte/>

### **Vorträge beim FachDialog (nicht veröffentlicht):**

Aigner, Achim: Aktive, nanoskalige Materialien in der Medizin: Nano trifft auf Bio

Galstyan, Anzhela: Licht gegen Antibiotika Resistenz: Darstellung, Charakterisierung und biologische Eigenschaften neuer fotoaktiver Materialien

Giese, Bernd: Was sind aktive, nanoskalige Materialien?

Hermann, Andreas: DNA-Hybridmaterialien für die Nanomedizin

Kolarić, Ivica: EAP NC – HUMAN MASCHINE INTERACTION

Tietjen, Lars: Regulatorische Aspekte bzgl. aktiver nanoskaliger Materialien in REACH- und CLP-VO

Wedel, Armin: Quantum Dots - eine neue Materialklasse für die Displaytechnologie