



In diesem Beitrag schildern Viktoriya Sokolova und Matthias Epple den gegenwärtigen Stand der biomedizinischen Forschung für Silber-, Gold-, Magnetit- und Calciumphosphat-Nanopartikel. Ausgewählte Beispiele veranschaulichen den aktuellen Forschungsstand.

Anorganische Nanopartikel

Anwendungen in der Medizin

Von Viktoriya Sokolova und Matthias Epple

Der medizinische Einsatz von Nanopartikeln ist ein wichtiger Teilbereich der Nanobiotechnologie. Nanopartikel weisen im Verhältnis zum Volumen einen sehr hohen Anteil an Atomen auf der Partikeloberfläche auf und haben deswegen häufig ganz andere elektronische, optische, mechanische und chemische Eigenschaften als das makroskopische Ausgangsmaterial („bulk“). Auch besondere biologische Eigenschaften können bei kleinen Partikeln auftreten. Die charakteristischen Abmessungen von Nanopartikeln liegen im Bereich von einem bis 100 Nanometern (ein Nanometer = 10^{-9} Meter). Es sei hier auch darauf hingewiesen, dass vieles von dem, was heute unter den Begriff „Nanotechnologie“ zusammengefasst wird, noch vor wenigen Jahrzehnten in das Kapitel „Kolloidchemie“ fiel. Die Entwicklung neuer Synthese- und Charakterisierungsmethoden hat seitdem zu einer enormen Vermehrung unseres

Wissens über nanoskalige Objekte geführt.

Hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung kann man Nanopartikel aus anorganischen Stoffen, aus organischen Stoffen (meist Polymere) und aus biologischen Stoffen wie Proteinen unterscheiden. Die Chemie anorganischer Nanopartikel ist stofflich sehr vielfältig; so wurden bereits viele anorganische Nanopartikel für unterschiedliche biologische Anwendungen untersucht. Beispiele sind Nanopartikel aus Calciumphosphat, Kieselsäure, Gold, Silber, Eisenoxid (Magnetit), Tonmineralien, Kohlenstoffnanoröhren und Halbleiter-Quantenpunkte wie beispielsweise Cadmiumsulfid. Anorganische Nanopartikel haben einige Vorteile gegenüber organischen und biologischen Nanopartikeln: Sie sind unempfindlich gegenüber mikrobiellem Abbau, leicht herstellbar, oft kaum toxisch und lassen sich gut lagern. In diesem Aufsatz wird der gegenwärtige Stand der biomedizi-

nischen Forschung für Silber, Gold, Magnetit und Calciumphosphat-Nanopartikel mit ausgewählten Beispielen illustriert.

Weil Nanopartikel sehr klein sind, können sie für therapeutische Zwecke genutzt werden, um die Zellwand durchzudringen und so pharmazeutische Wirkstoffe oder Biomoleküle in lebende Systeme einzuschleusen. Dabei werden die Nanopartikel als so genannte Drug Delivery-Systeme eingesetzt, die als Transporter der Wirkstoffe in die Zellen dienen. Auf der Basis von Nanopartikeln ist es daher möglich, völlig neue Therapiestrategien zu entwickeln. Viele Medikamente haben Nebenwirkungen, die durch eine unspezifische Verteilung der Wirkstoffe im Körper verursacht werden, wenn man sie beispielsweise als Tablette oder als Injektion verabreicht. In diesem Fall verteilt sich der Wirkstoff im ganzen Körper, auch wenn er eigentlich nur lokal wirken sollte. Auch ist bei man-

chen pharmazeutischen Stoffen die Wirksamkeit eingeschränkt, da sie eine geringe Verweildauer im Blut aufweisen, chemisch oder biologisch labil sind oder auch Immunreaktionen auslösen können. Im Vergleich zu gelösten Wirkstoffen können Nanopartikel gezielter wirken, daher sind kleinere Mengen nötig. Man kann auch Wirkstoffe in Nanopartikel einschließen und damit vor dem Abbau durch Enzyme schützen. Die gezielte Ansteuerung von Tumoren kann über die Funktionalisierung der Partikeloberfläche mit Antikörpern erreicht werden, so dass injizierte Nanopartikel idealerweise ihren Weg zu einem Tumor im Körper selbst finden. Dies ist im Fall von Metastasen besonders wichtig. Dort können sie dann ihre zerstörende Wirkung auf den Tumor ausüben, ohne das gesunde Gewebe im Körper zu beeinträchtigen.

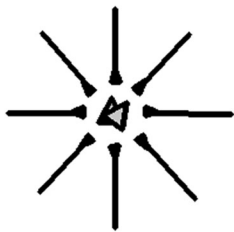
Nanopartikel kann man für die Diagnostik und für die Behandlung von Krankheiten verwenden. So können Partikel hergestellt werden, die unterschiedlich groß

Zellzwischenräume von gesundem Gewebe und von Tumorgewebe ausnutzen, um Wirkstoffe in Tumoren anzureichern. Oder es können Transportsysteme entwickelt werden, die gezielt an molekulare Strukturen im kranken Gewebe anhaften, um so Kontrastmittel im erkrankten Gewebe anzureichern und damit besser sichtbar zu machen. Man kann auch die Neubildung von gesundem Gewebe gezielt durch die Verabreichung von Wachstumsfaktor-beladenen Nanopartikeln stimulieren. Generell kann man die Anwendung von Nanopartikeln in der Medizin in die Gebiete Wirkstofffreisetzung, Diagnostik und Regenerative Medizin einteilen. Einige Arten von anorganischen Nanopartikeln sind in Abbildung (1) dargestellt; einige Anwendungen finden sich in Tabelle (2).

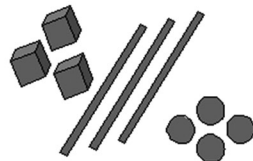
Metalle: Nanopartikel aus Silber und Gold

Die Chemie von Gold- und Silber-Nanopartikeln ist insgesamt

sehr gut erforscht. Sie lassen sich mit chemischen und physikalischen Methoden in einer Vielfalt von Größen – beginnend bei etwa einem Nanometer bis in den Mikrometerbereich – und Formen (zum Beispiel Kugeln, Würfel, Stäbchen, Dreiecke, Hohlkugeln) herstellen. Insbesondere Gold-Nanopartikel werden häufig eingesetzt, da sie reproduzierbar herstellbar und gut chemisch funktionalisierbar sind. Man kann Gold-Nanopartikel reproduzierbar herstellen und ihre Oberfläche mit verschiedenen funktionellen Gruppen chemisch modifizieren, beispielsweise mit Antikörpern. Chemisch und biologisch sind sie weitgehend inert. Gewöhnlich werden metallische Nanopartikel durch Reduktion der entsprechenden Metallsalze in Gegenwart geeigneter Schutzgruppen hergestellt, die die weitere Aggregation der gebildeten Nanopartikel verhindern. Gold-Nanopartikel mit einer Größe von 20 Nanometern und weniger werden leicht von Zellen aufgenommen. Die



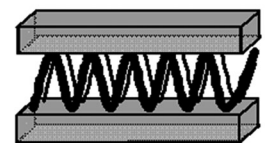
Gold-Cluster



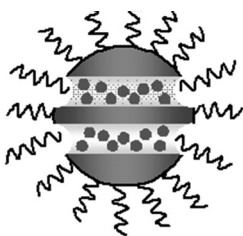
Silber



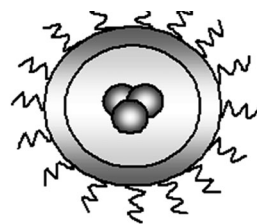
Kohlenstoffnanoröhren



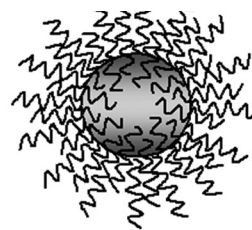
Schichtverbindungen
(Hydrotalkite)



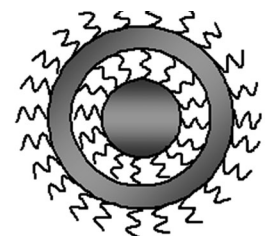
mesoporöse Nanopartikel



Kieselensäure, beschichtet
mit Gold-Nanopartikeln



funktionale Nanopartikel



mehrschalige Nanopartikel

(1) Einige Beispiele für anorganische Nanopartikel.

Art des Nanopartikels	Biologische Anwendung
Gold	Transport von Biomolekülen in Zellen (Transfektion, Gene-Stummschaltung); Zytostatikum (Hemmung des Zellwachstums); Kontrastmittel; Tumor-Thermotherapie
Silber	Bakterizide Wirkung, zum Beispiel bei Katheter- und Implantat-Beschichtungen
Eisenoxid (Magnetit)	Adressierung von Tumoren; Tumor-Thermotherapie; Sortierung von Zellen
Calciumphosphat	Transport von Biomolekülen in Zellen (Transfektion, Gene-Stummschaltung); Photodynamische Therapie; Wirkstoffträger
Kohlenstoffnanoröhren	Biosensoren; Substrate für gerichtetes Zellwachstum; Transport von Biomolekülen in Zellen; Wirkstoffträger
Hydrotalkit (ein Tonmineral)	Transport von Biomolekülen in Zellen
Kieselsäure	Transport von Biomolekülen in Zellen; Wirkstoffträger
Metalle	Nanopartikel aus Silber und Gold

(2) Beispiele für die biomedizinische Anwendung von anorganischen Nanopartikeln.

nur 1,4 Nanometer kleinen Au_{55} -Goldcluster können auch direkt mit DNA wechselwirken. Gold-Nanopartikel werden auch in der Krebstherapie eingesetzt. Dabei werden die Gold-Nanopartikel beispielweise mit Radionukliden oder Wirkstoffen funktionalisiert, um die Krebszellen lokal zu zerstören.

In der *in vivo*-Diagnostik sind Gold-Nanopartikel als Kontrastmittel etabliert. Sie spielen als Ultraschall-Kontrastmittel eine wichtige Rolle bei der Früherkennung von Krebs. Dieses Verfahren basiert auf Gold-Nanopartikeln, die mit einem spezifische Antikörper verbunden sind und damit direkt an die Krebszellen gelangen. In Gewebe- oder Zellproben kann man einzelne Bestandteile von Zellen durch Gold-Nanopartikel adressieren, die mit Antikörpern funktionalisiert sind. In der Transmissionselektronenmikroskopie lassen sich die „schweren“ Gold-Nanopartikel dann gut erkennen und damit die gesuchten Zellbestandteile oder Biomoleküle in der

Zelle lokalisieren. Dies funktioniert auch zum spezifischen Nachweis von DNA, indem man einen komplementären DNA-Strang an die Goldpartikel-Oberfläche anbindet. Damit kann man krankheitsspezifische DNA-Marker in einem *in vitro*-Test identifizieren. Im Vergleich zu normalem Gewebe kann Gold elektromagnetische Strahlung wie zum Beispiel Laserlicht viel besser in Wärme umwandeln. Damit kann man Krebszellen gezielt thermisch zerstören.

Silber wird seit mehreren tausend Jahren in Form von Essbesteck und Münzen eingesetzt, da es gegen Bakterien eine ausgeprägte toxische Wirkung besitzt – für Kupfer gilt übrigens das Gleiche. Silber gibt im Gebrauch laufend kleinste Mengen an Silber-Ionen ab, die für Bakterien viel schädlicher sind als für höhere Organismen. Für diese anti-infektive Wirkung werden metallische Beschichtungen, Silbersalze und seit einigen Jahren auch Silber-Nanopartikel eingesetzt. In der Biome-

dizin schützen Silber-Nanopartikel vor der Bildung von Biofilmen (Bakterienkolonien) und Infektionen. In letzter Zeit werden auch zahlreiche Gebrauchsgegenstände mit Silber-Nanopartikeln beschichtet, um die Vermehrung oder die Übertragung von Keimen zu verhindern. Typische Beispiele sind Kleidungsstücke wie Sportsocken und T-Shirts, Külschrankinnenwände oder Mobiltelefone. Wundverbände und Pflaster mit Silber-Nanopartikeln sollen die Bakterienbesiedelung verhindern und die Heilungsprozesse damit beschleunigen. Es sind aber auch heute noch viele Fragen offen, zum Beispiel nach der notwendigen Dosis an Silber und dem Risiko einer Bildung bakterieller Resistenzen. Wie im Fall des Goldes können auch Silber-Nanopartikel in unterschiedlichen Größen und Formen hergestellt werden; inwieweit die biologische Wirkung von diesen Parametern abhängt, ist Gegenstand der laufenden Forschung.

Nanomagnete: Magnetit

Magnetit-Nanopartikel (Fe_3O_4) können aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften für die Tumortherapie (Hyperthermie) eingesetzt werden. Durch lokale Injektion oder über die Blutbahn gelangen Magnetit-Nanopartikel zu den Krebszellen. Durch eine Anregung mit einem Laser oder einem starken Magnetfeld entsteht lokale Wärme, die die Wirkung von konventionellen Therapieverfahren wie Bestrahlung oder Chemotherapie verstärkt und damit die Tumor-Zellen zerstört. Vorteilhaft ist auch das Dirigieren dieser magnetischen Nanopartikel durch von außen an den Körper angelegte Magnetfelder, zum Beispiel in die Nähe von Tumoren. In der Zellbiologie können magnetische Nanopartikel, die sich gezielt an bestimmte Zellsorten anheften, auch zur Sortierung von unterschiedlichen Zelltypen eingesetzt werden. Weitere Arten von magnetischen Nanopartikeln werden untersucht, die teilweise bessere

magnetische Eigenschaften besitzen wie beispielsweise Eisen-Platin-Legierungen (FePt); das Eisenoxid steht aber aufgrund seiner sehr guten biologischen Verträglichkeit im Vordergrund.

Feinverteiltes Knochen-mineral: Calciumphosphat

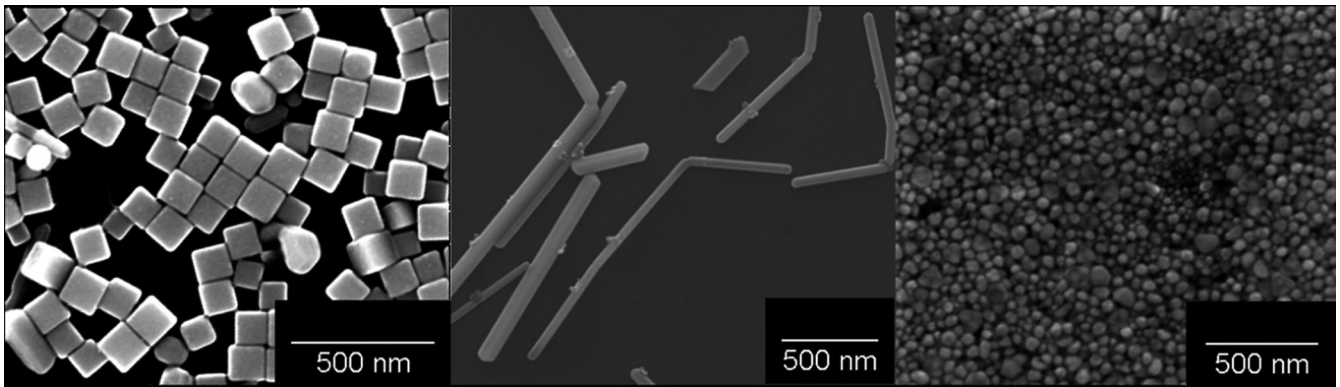
Calciumphosphat ist das anorganische Biomineral in vielen Hartgeweben wie in Knochen und Zähnen. Im Knochen und im Dentin (Zahnbein) kommt das Calciumphosphat von Natur aus in Form kleiner Nanopartikel vor. Calciumphosphat ist daher sehr gut biologisch verträglich und auch im Körper abbaubar. Dies ist ein Vorteil gegenüber

Analyse von Struktur, Funktion und Regulation von Genen; weiterhin bildet es die konzeptionelle Grundlage für die Gentherapie, das heißt die gezielte Behandlung genetisch bedingter Krankheiten.

Eine Zelle verfügt über viele Grenzen wie die Zellmembran und die Kernmembran, die als Barriere gegenüber der Außenwelt dienen. Normalerweise sind Biomoleküle wie DNA oder Polypeptide allein nicht in der Lage, in eine Zelle einzudringen, daher sind Transporter-Systeme wie anorganische Nanopartikel erforderlich. In Abbildung (4) ist der Weg von Nanopartikeln in eine Zelle dargestellt. Zunächst lagern sich die Nanopartikel an die Zellmembran an und werden

der Zelle zu verfolgen, wenn man das Calcium teilweise durch fluoreszierende Ionen ersetzt. Wir haben hier die Seltenerd-Metalle (Lanthanoide) Terbium (grüne Fluoreszenz) und Europium (rote Fluoreszenz) verwendet. Eine andere Möglichkeit ist die Funktionalisierung der DNA durch geeignete chemische Gruppen, die ihrerseits fluoreszieren. Durch besondere lasermikroskopische Verfahren (konfokale Laserscanning-Mikroskopie) kann man die fluoreszierenden Nanopartikel dann erst an der Zelloberfläche und später in der Zelle sichtbar machen.

Durch die Beladung von Nanopartikeln mit besonderen Biomolekülen lassen sich auch Zellen des Immunsystems, so genannte den-



(3) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Silber-Nanopartikeln in unterschiedlicher Form und Größe.

vielen anderen Nanopartikeln. Man kann Calciumphosphat-Nanopartikel in unterschiedlichen Gebieten einsetzen, zum Beispiel als Wirkstoffträger in der Krebstherapie, für die zellspezifische Aufnahme von DNA (der Erbinformation), zur Programmierung von Zellen, in der Immunologie für die Aktivierung von Abwehr-Zellen oder für die Behandlung von Tumoren mit Licht in Kombination mit einer lichtempfindlichen Substanz (Photodynamische Therapie). Die gezielte Einführung von Nukleinsäuren (DNA oder RNA) in Zellen ist heute ein wichtiges Instrument zur

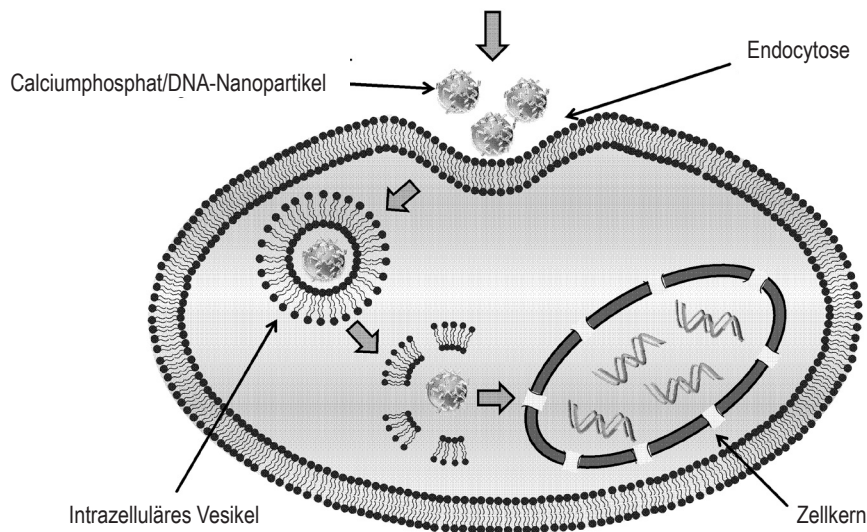
anschließend durch Endozytose in die Zelle aufgenommen. Auf dem Weg zum Zellkern kann die DNA abgebaut werden, zum Beispiel durch Enzyme wie die so genannten Nukleasen, die auf den Abbau von fremder DNA spezialisiert sind. Wir haben Calciumphosphat-Nanopartikel entwickelt, in denen die DNA im Inneren gegen Enzymen geschützt ist und außen als Schutzschicht gegen die Aggregation dient. Damit ist eine erheblich bessere Übertragung der Biomoleküle in die Zelle möglich (Abb. 4).

Es ist möglich, den Weg solcher Calciumphosphat-Nanopartikel in

dritische Zellen, selektiv adressieren und stimulieren. Damit kann das Immunsystem zielgerichtet aktiviert und möglicherweise auch gegen chronische Infektionen gerichtet werden (Abb. 5).

Photodynamische Therapie mit funktionalisierten Nanopartikeln

Die Photodynamische Therapie ist eine Methode zur Behandlung bestimmter Krebsarten wie Hautkrebs oder Melanome und zur Bekämpfung von bakteriellen Infektionen (zum Beispiel Biofilme). Bei dieser Therapie werden spezielle



(4) Illustration des Wegs von Nanopartikeln in eine Zelle am Beispiel von Calciumphosphat/DNA-Nanopartikeln: Anlagerung an die Zellmembran, Aufnahme in ein intrazelluläres Vesikel, Verlassen des Vesikels und Weg der DNA bis in den Zellkern.

Farbstoffmoleküle verwendet, die auf oder in das entsprechende Gewebe eingebracht werden, beispielsweise durch Injektionen. Wenn solche Farbstoffe mit Laserlicht der passenden Wellenlänge bestrahlt werden, dann nehmen sie die Lichtenergie auf und übertragen diese auf Sauerstoffmoleküle, die sich in der Umgebung befinden. Der Sauerstoff wird angeregt und geht dabei in den sogenannten Singulett-Zustand über, in dem er sehr aggressiv und reaktiv ist. Damit können das bösartige Gewebe oder die Bakterienkolonien effektiv lokal bekämpft werden (Abb. 7).

Eine Erweiterung dieser Methode bieten anorganische Nanopartikel, die mit den entsprechenden Farbstoffen beladen sind. Diese lassen sich in Wasser dispergieren, im Gegensatz zu vielen gängigen Farbstoffen, die nur in Alkohol löslich sind. Die Verabreichung der alkoholischen Lösungen kann für den Patienten schmerzhaft sein. Weiterhin kann man mit Nanopartikeln ein Zielgewebe (wie einen Tumor) besser adressieren und so das gesunde Gewebe schonen. Eine Funktionalisierung der Nanopartikel-Oberfläche kann dazu dienen, gezielt das gewünschte Gewebe anzusteuern.

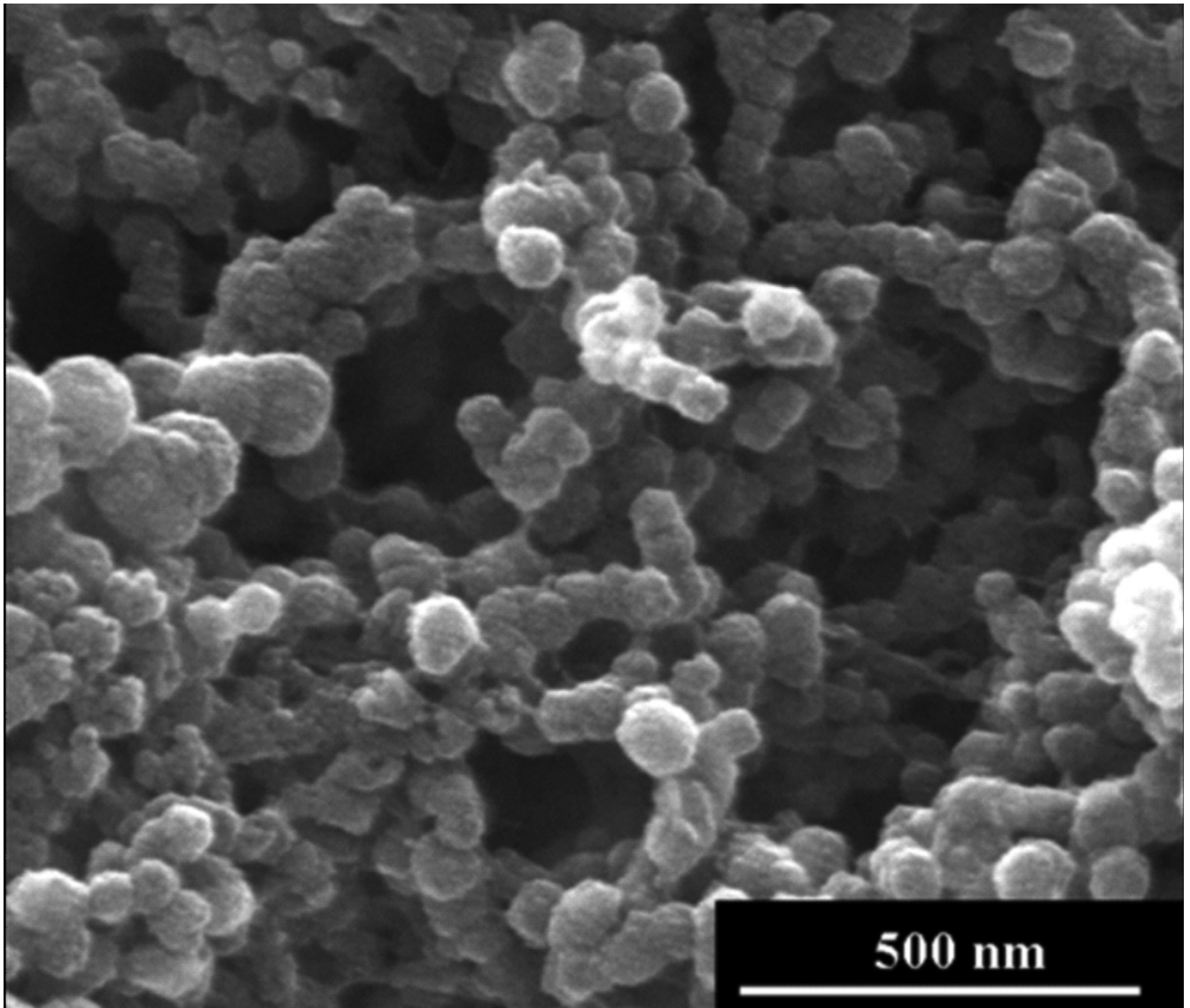
Anorganische Nanopartikel und Implantate

In der regenerativen Medizin gibt es vielfältige Einsatzbereiche für Nanomaterialien, beispielsweise Beschichtungen für Hüftprothesen oder Zahnimplantate, die ein besseres Anwachsen des umgebenden Knochens ermöglichen. Es besteht ein hoher Bedarf an optimierten Implantatmaterialien, um die Zeit bis zum Einheilen – und damit bis zur mechanischen Belastung – zu verringern und die Lebensdauer der Implantate zu erhöhen. Sowohl künstliche Hüftgelenke als auch Zahnimplantate werden jährlich zu Hunderttausenden implantiert. In beiden Fällen ist die schnelle Belastbarkeit zur Wiederherstellung der Funktion von hoher Priorität für den Patienten. Entscheidend für die Integration eines Implantates in das umgebende Gewebe ist die Anlagerung von Proteinen, die die nachfolgende Zelladsorption steuern und das Zellwachstum stimulieren. Um die Anlagerung von Proteinen zu kontrollieren, wurden nanostrukturierte Implantatoberflächen entwickelt, die die Wechselwirkung mit Knochenzellen verbessern.

Eine andere Möglichkeit sind nanokristalline Knochenersatzmaterialien, die der Struktur des ebenfalls nanokristallinen Knochenminerals möglichst nahe kommen. Nanokristallines Calciumphosphat wird als Paste zum Knochenaufbau verwendet und in Knochendefekte hineingespritzt. Aufgrund der nanokristallinen Struktur können knochenbildende Zellen einwandern und das Knochenersatzmaterial so durch natürlichen Knochen ersetzen.

Anorganische Nanopartikel in Zahnpasta

Parodontose oder Parodontitis, das heißt sich zurückziehendes Zahnfleisch durch bakterielle Besiedlung, was zur partiellen Offenlegung der tieferliegenden Bereiche eines Zahnes führt, ist eine weitverbreitete Krankheit (in Deutschland etwa zwölf Millionen Betroffene). Offene Zahnhälse können Schmerzen verursachen, da dann die Kanäle im Zahnbein (Dentin) freiliegen und die direkte Reizleitung zum Nerv erlauben. Da Zähne im Wesentlichen aus Calciumphosphat bestehen, bieten sich Calciumphosphat-Nanopartikel dazu an, diese Kanäle zu verschlie-



(5) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Calciumphosphat/DNA-Nanopartikeln. Die Partikel sind annähernd rund mit einem Durchmesser von 50 bis 100 Nanometern.

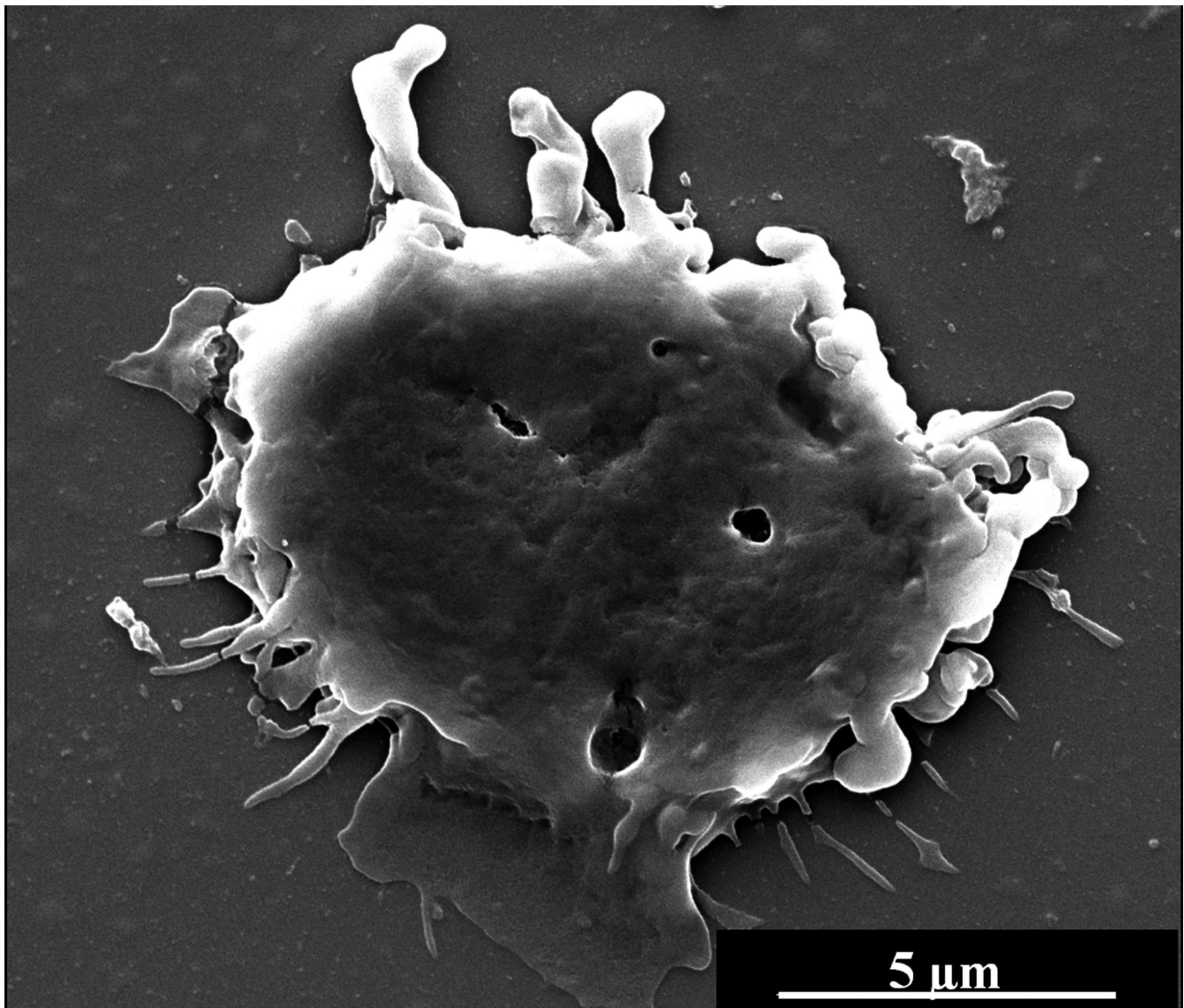
ßen. In mehreren Zahnpasta- und Mundspülungspräparaten werden Mikro- und Nanopartikel aus Calciumphosphat dazu verwendet, diesen Effekt zu erreichen. Wenn die Dentinkanäle verschlossen sind, dann ist die Reizleitung zum Nerv unterbrochen. Weiterhin könnte es zu einer langfristigen Reparatur des Zahndefekts kommen, das heißt zum permanenten Verschluss der Dentinkanäle und möglicherweise auch zum Überwachsen mit Zahnfleisch. Als weitere mögliche Wirkung könnten Risse und Löcher im Zahnschmelz wieder verschlossen

werden. Allerdings ist es unklar, wie wirksam eine solche Behandlung ist, da entsprechende klinische Studien naturgemäß schwierig auszurichten sind. Dennoch werden Zahnpasta-Präparate mit Calciumphosphat-, Mikro- und Nanopartikeln derzeit stark beworben.

Zusammenfassung

Die Anwendungsmöglichkeiten von Nanopartikeln in der Medizin sind längst noch nicht ausgeschöpft. Besonders das gezielte Einbringen von Medikamenten und das Ansteu-

ern von krankem oder infiziertem Gewebe bieten noch viel Potenzial, wenn es einmal gelungen ist, die Adressierung in verlässlicher und selektiver Weise durchzuführen. Hier sind neben Konzepten zum Design von wirkstoffbeladenen Nanopartikeln besonders auch Chemiker gefordert, die die Oberfläche der Nanopartikel mit spezialisierten Molekülen beladen können. Zur Untersuchung der Wirksamkeit bedarf es der Kooperation mit Biowissenschaftlern und Medizinern, um das optimale Wirkprofil zu ermitteln und um mögliche adverse



(6) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer dendritischen Zelle des Immunsystems, die mit Calciumphosphat-Nanopartikeln stimuliert werden kann.

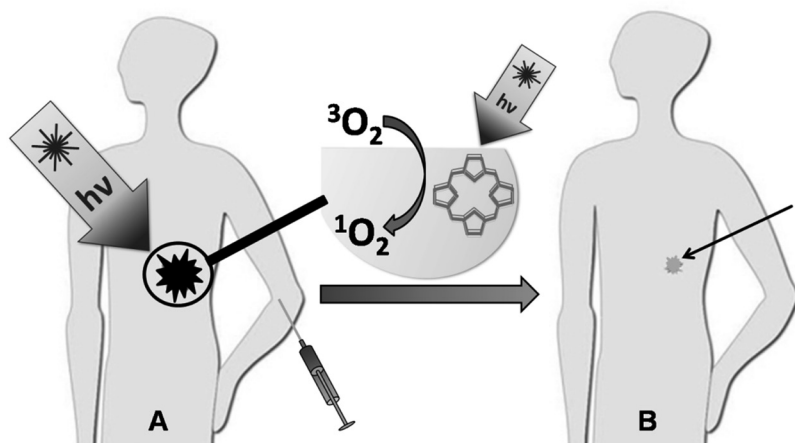
Effekte schon im Vorfeld auszuschließen. Es darf dabei nicht unterschätzt werden, dass Nanopartikel aufgrund ihrer geringen Größe eine hohe Mobilität im Körper aufweisen, also auch an Stellen kommen (bis ins Gehirn), für die sie nicht gedacht waren. Das bedeutet, dass mögliche Gefährdungen und auch Anreicherungen schon im Vorfeld einer klinischen Anwendung ausgeschlossen werden müssen. Die entsprechenden Untersuchungen sind nicht einfach, da Nanopartikel aufgrund ihrer geringen Größe im Körper nur schlecht wiederzu-

finden sind. Außerdem sind noch viele Fragen zu den grundlegenden biologischen Wirkmechanismen von Nanopartikeln offen und bedürfen der weiteren Erforschung. Man kennt viele Arten von Nanopartikeln, von denen schon viele an biologischen Systemen getestet wurden und sich einige in klinischen Testphasen befinden. Unsere Beispiele entstammen teilweise der Grundlagenforschung und der klinischen Forschung, so dass in manchen Fällen der Weg zur praktischen Anwendung erst noch geebnet werden muss.

Summary

Nanoparticles offer many unexplored possibilities in biomedicine. The controlled delivery of drugs and the direction into malignant or infected tissue in particular will have a bright future when a reliable and selective addressing has been finally accomplished. To achieve this goal, drug-loaded nanoparticles must be developed, and the work of chemists is necessary to attach specialised molecules on to their surface. To





(7) Grundprinzip der Photodynamischen Therapie. Farbstoffmoleküle werden in die Nähe eines zu zerstörenden Gewebes (Tumorzellen oder Bakterien) gebracht und dann mit einem Laser angeregt. Dabei entsteht der sehr reaktive Singulett-Sauerstoff 1O_2 , der das Gewebe zerstört.

assess the biological action, a strong collaboration between bioscientists and physicians is necessary; both to assure the optimal biological action and to exclude possible adverse effects well in advance. The high mobility of nanoparticles in the body due to their small size should not be underestimated. They have the ability to travel into many organs, including the brain. It is therefore essential to pre-empt any adverse effects or accumulations well in advance of a clinical trial. Such investigations are not easy because it is difficult to detect nanoparticles in the body due to their small size. Furthermore, there are still many open questions concerning the fundamental biological action of nanoparticles that need to be elucidated. Many kinds of nanoparticles are known, many have been tested in biological systems, and some are in clinical trials. Our examples come partially from fundamental research and from clinical research, and in some cases; the pathway to a clinical application still has to be travelled.

Literatur

- Epple, M., Biomaterialien und Biomineralisation. Eine Einführung für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. Teubner: Wiesbaden, 2003.
- Schmid, G., Nanoparticles. From Theory to Application. Wiley-VCH: Weinheim, 2004.
- Niemeyer, C. M.; Mirkin, C. A., Nanobiotechnology. Wiley-VCH: Weinheim, 2004.
- Epple, M.; Bauerlein, E., Biomineralisation: Medical and Clinical Aspects. Wiley-VCH: Weinheim, 2007.
- Grainger, D. W.; Castner, D. G., Nanobiomaterials and nanoanalysis: Opportunities for improving the science to benefit biomedical technologies. *Adv. Mater.* 2008, 20, 867–877.
- Williams, D. F., On the nature of biomaterials. *Biomaterials* 2009, 30, 5897–5909.
- Riehemann, K.; Schneider, S. W.; Luger, T. A.; Godin, B.; Ferrari, M.; Fuchs, H., Nanomedizin – Herausforderung und Perspektiven. *Angew. Chem.* 2009, 121, 886–913.

Die Autorin und der Autor

Viktoriya Sokolova schloss 2003 das Studium der Biologie an der V. N. Karazhin Kharkiv National University (Ukraine) ab und promovierte bis 2006 bei Prof. Epple an der Universität Duisburg-Essen in Chemie. 2007 erhielt sie den Nachwuchswissenschaftlerpreis der Familie Klee („Klee-Preis“) der DGBMT, den Doktorandenpreis der Deutschen Gesellschaft für Biomaterialien und war im Finale des DSM Science & Technology Award 2007. In ihrer Dissertation beschäftigte Sokolova sich mit der Synthese, der Charakterisierung und der Anwendung

von Calciumphosphat-Nanopartikeln für die Transfektion von Zellen. Seit April 2009 ist sie Habilitandin an der Universität Duisburg-Essen bei Prof. Matthias Epple und arbeitet im Rahmen des Transregio TRR 60 „Immuntherapie bei chronischen Virusinfektionen“ an der gezielten Steuerung biologischer Vorgänge durch anorganische Nanopartikel.

Matthias Epple studierte von 1984 bis 1989 Chemie an der Technischen Universität Braunschweig. Hier promovierte er auch 1992 mit Auszeichnung. 1993 war Epple Postdoktorand am Department of Chemical Engineering, University of Washington, Seattle, USA, bei Prof. J. C. Berg, dann von 1994 bis 1997 Habilitand am Institut für Anorganische und Angewandte Chemie der Universität Hamburg bei Prof. A. Reller. Forschungsaufenthalte führten ihn 1995 und 1996 an die Royal Institution in London und die Universität Cambridge. 1997 folgte Matthias Epples Habilitation am Fachbereich Chemie der Universität Hamburg im Fachgebiet „Festkörperchemie“. Nach einer Vertretungsprofessur für Festkörperchemie an der Universität Augsburg wurde er Professor für Anorganische Chemie an der Ruhr-Universität Bochum; dort war er auch von 2002 bis 2003 Studiendekan der Fakultät für Chemie. Seit 2003 ist Matthias Epple Professor für Anorganische Chemie an der Universität Duisburg-Essen. Von 2004 bis 2008 war er Studiendekan des Fachbereichs Chemie, seit 2008 ist er Dekan der Fakultät für Chemie der Universität Duisburg-Essen. Darüber hinaus ist er seit 2008 Mitglied der Fachkommission für Chemie für das Zentralabitur des Landes Nordrhein-Westfalen und seit 2010 geschäftsführender Vorsitzender der Deutschen Gesellschaft für Biomaterialien. Zahlreiche Auszeichnungen und Stipendien pflastern Matthias Epples Weg, so unter anderem ein Promotionsstipendium des Fonds der Chemischen Industrie, der Doktoranden-Fortbildungspreis der Hoechst AG, ein Postdoktoranden- und ein Habilitationsstipendium der DFG, der Netzsch-GEFTA-Förderpreis der Gesellschaft für Thermische Analyse e.V. (GEFTA), ein Heisenberg-Stipendium und 1998 der Heinz Maier-Leibnitz-Preis der DFG. Im Jahr 2004 war er Fellow of the Program for the Invitation of Foreign Scientists to Japanese Institutes by the Japanese Association for the Advancement of Medical Equipment (JJAME Fellowship) und seit 2007 ist er Fellow of the Royal Society of Chemistry (FRSC). Matthias Epples Forschungsinteressen sind zurzeit die Reaktivität von Festkörpern, die Entwicklung und Anwendung von Biomaterialien, die biomimetische Kristallisation anorganischer Materialien sowie die Synthese und Funktionalisierung anorganischer Nanopartikel.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/73851

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20210217-114733-2

Alle Rechte vorbehalten.