

Umwelt Campus Birkenfeld

Fachhochschule Trier

Anorganische Chemie

Fullerene und Kohlenstoff Nanoröhren

Herstellung Anwendung Ökobilanz

Dozent: Prof. Dr. rer. nat. Eckard Helmers

Wintersemester 2011

Vorgelegt von:

Timo Sander

Matrikelnummer: 951816

Tim Olk

Matrikelnummer: 951795

Inhalt

1. Einführung	
1.1. Was sind Fullerene?	2
1.2. Geschichte	2
1.3. Was sind Nanotubes ?	3
1.4. Geschichte	4
2. Herstellungsmethoden	
2.1. Chemical Vapor Deposition	5
2.1.1. PECVD-Verfahren	7
2.2. Lichtbogenentladungsmethode	8
2.3. Laserverdampfung	9
2.4. Hausgemachte Nanopartikel	10
2.5. Frühe unbewusste Erzeugung	10
3. Anwendungen	
3.1. Fullerene	
3.1.1. Kommerzielle Anwendung	11
3.1.2. Labormaßstab	12
3.2. Nanotubes	
3.2.1. Anwendungen von Carbon Nanotubes	14
3.2.2. Forschung und Entwicklung	15
3.2.3. Preise	16
4. Ökobilanz	
4.1. Ökobilanz von Fullerenen	
4.1.1. Herstellung	17
4.1.2. Wirkung auf den Mensch	18
4.1.3. Wirkung auf die Umwelt	18
4.1.4. Entsorgung	19
4.2. Gefahren und Risiken in Bezug auf Nanotubes	19
4.2.1. Toxizität	20
4.2.2. Umweltauswirkungen	21
5. Fazit	22
Literaturverzeichnis	
Bildverzeichnis	

1. Einführung

Sie haben die Struktur eines Fußballes, sind nach einem Architekten benannt, können andere Atome aufnehmen, befinden sich in Anti-Aging Cremes und sind so vielseitig wie ein Verwandlungskünstler. Die Rede ist hier von Fullerenen auch 'Bucky-Balls' genannt.

Im zweiten Teil werden Sie erfahren wie man mit Kohlenstoff nicht nur Fullerene sondern auch röhrenförmige Gebilde, namentlich Nanoröhren, herstellen kann und welche neuen Eigenschaften daraus entstehen.

Im Folgenden werden die möglichen Anwendungen und die Ökobilanz von Fullerenen und Kohlenstoffnanoröhren diskutiert.

Das Thema Fullerene wurde von Tim Olk bearbeitet und Nanotubes von Timo Sander.

1.1 Was sind Fullerene?

Fullerene oder auch 'Bucky-Balls' genannt, sind runde, fußballförmige Kohlenstoffmoleküle, die meist aus 60 Kohlenstoffatomen bestehen. Es gibt aber auch höhere Fullerene mit 70, 76, 78 ... C_{60} -Moleküle haben zwölf Fünfringe und 20 Sechsringe.

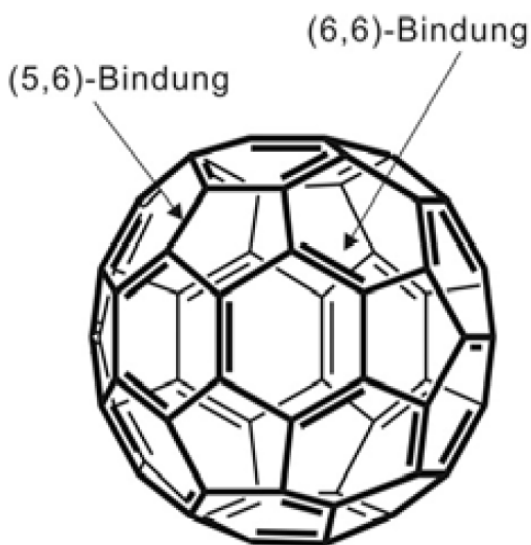


Abbildung 1: Fulleren C_{60}



Abbildung 2: Fußball zum Vergleich

Sie werden je nach Herstellungsverfahren aus verschiedenen Kohlenstoffquellen hergestellt. Dazu wird das meist flache Edukt mit anderen vereinigt und so entsteht der symmetrische Käfig.

1 Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, 2005, S. 38

2 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6e/Football_%28soccer_ball%29.svg/450px-Football_%28soccer_ball%29.svg.png Abgerufen 01.11.11

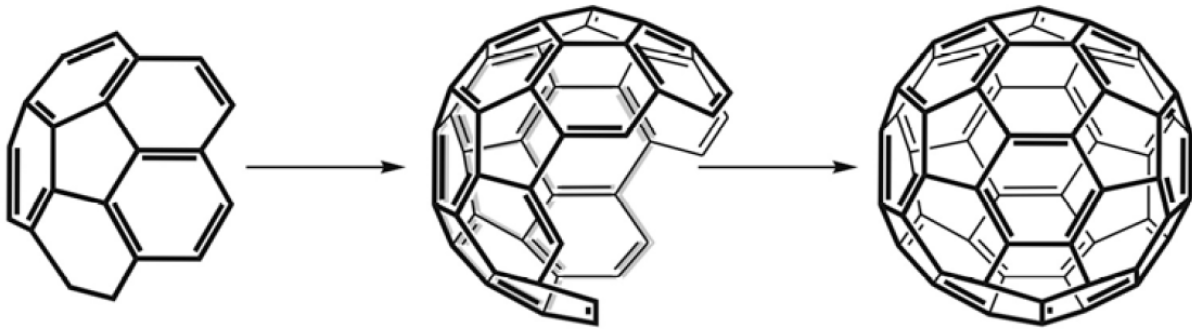


Abbildung 3: Bildung eines Fullerenkäfigs³

Die Kohlenstoffkäfige besitzen vielfältige Eigenschaften, die dieses Molekül sehr interessant machen. Neben den reinen Kohlenstoff kann das Gitter auch mit anderen Atomen verunreinigt werden und so neue Eigenschaften erstellt werden.

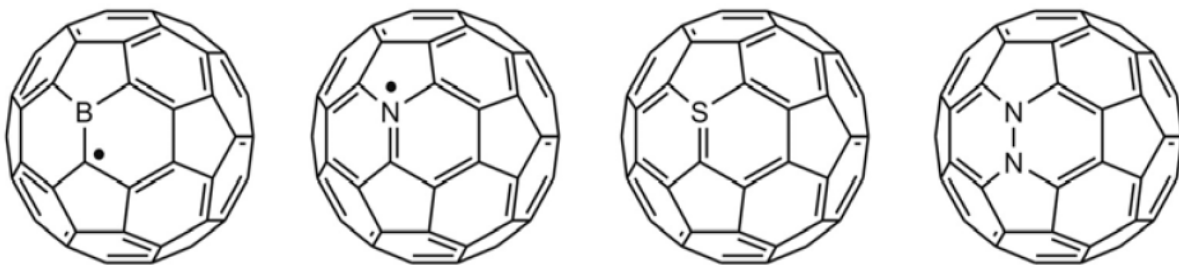


Abbildung 4: 'Verunreinigte' Fullerene oder auch Heterofullerene⁴

In der Mitte der Fullerene können einzelne Atome eingeschlossen werden, was vor allem in der Medizin Anwendungsmöglichkeiten schafft.

Viele Fullerene sind nie experimentell einwandfrei nachgewiesen worden, müssen aber theoretisch existieren.

1.2 Geschichte

1970 wurde die erste theoretische Abhandlung über die Struktur und Beschaffenheit von verschiedenen Kohlenstoffkäfigen veröffentlicht.⁵ Aber erst 1985, als mehrere Wissenschaftler in der Zeitschrift 'Nature' einen Artikel veröffentlichten, wurde das Thema bekannt. 1996 wurde der Nobelpreis für Chemie an diese Wissenschaftler vergeben. Osawa, der eigentliche 'Erfinder' wurde nicht gewürdigt.

Der Name Fullerene oder auch 'Bucky-Balls' genannt, geht auf Richard Buckminster Fulleren zurück, der die Form der Kohlenstoffkäfige konstruiert hat.

³ Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, 2005, S.42

⁴ Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, 2005, S.48

⁵ Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, 2005, S.35

1.3 Was sind Nanotubes ?

Carbon Nanotubes, kurz CNT, sind röhrenförmige Gebilde aus Kohlenstoff. Nur, dass man sich hier im Nanometerbereich bewegt. ⁶

Ein Nanometer ist definiert als ein Millionstel Millimeter. Also unvorstellbar klein. ⁷

Nun muss man hier aber zwischen Single Wall Nanotubes(SWNT) und Multi Walled Nanotubes(MWNT), zu Deutsch: mehrwandige Nanoröhren, unterscheiden.

MWNT sind also mehrere ineinander geschobene einwandige Nanoröhren, die, wie die Single Walled Nanotubes, innen einen zylindrischen Hohlraum besitzen. ⁸

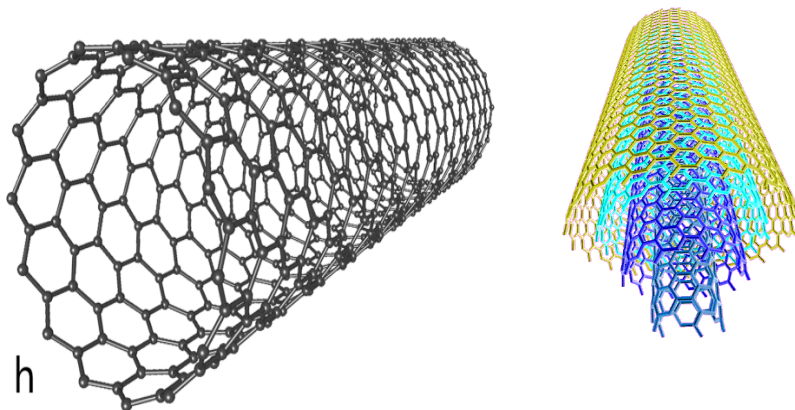


Abbildung 5: Darstellung eines Single Walled Nanotube (links) und eines Multi Walled Nanotubes (rechts). ^{9, 10}

1.4 Geschichte

MWNT's wurden durch Zufall von Sumio Iijima 1991 mittels eines Elektronenmikroskops entdeckt. Er hatte eine Lichtbogenentladung zwischen zwei Kohlenstoffelektroden erzeugt.

1993 wurden dann, ebenfalls beim Lichtbogenverfahren und unter Zugabe eines metallischen Katalysators, die einwandigen Kohlenstoffröhren entdeckt.

Jedoch wurden schon vor 1991 Nanotubes entdeckt und auch publiziert. 1952 erschien ein Artikel der russischen Forscher Radushkevich und Lukyanovich

Da die Veröffentlichung in einer sowjetischen Zeitschrift auf Russisch geschah, ist diese Entdeckung jedoch nicht in die breite Öffentlichkeit gelangt. ¹¹

⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffnanoröhren>

⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Meter>

⁸ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffnanoröhren>

⁹ Sabine Greßler, René Fries, Myrtill Simkó, Nano trust Dossiers, Nr.022, März 2011

¹⁰ <http://spectrum.ieee.org/image/1952588>

¹¹ http://edoc.ub.uni-muenchen.de/8522/1/Dupraz_Christian.pdf

2. Herstellungsmethoden

2.1. Chemical vapor deposition

Chemical vapor deposition bedeutet zu Deutsch „chemische Abscheidung aus der Gasphase“.¹²

Das CVD-Verfahren hat derzeit die größte Bedeutung, da es die Herstellung größerer Mengen von CNTs unter besser kontrollierbaren Bedingungen erlaubt und kostengünstiger ist.

Der CVD-Prozess findet in einer vakuumhaltenden Kammer statt. Ein kohlenstoffhaltiges Gas (Kohlenmonoxid, Ethen) wird über einen Katalysator geleitet. Der Katalysator, der auf Substrat angebracht ist, besteht in der Regel aus Kobalt, Nickel oder Eisen und wird durch Ätzen vorbehandelt. Es entstehen zunächst sogenannte Sekundärpartikel die dem Durchmesser der entstehenden Nanotubes entsprechen. Nun bilden sich an diesen Sekundärpartikeln die Nanotubes wobei sich die Partikel entweder am unteren oder am oberen Ende befinden können. Das Wachstum endet sobald die Katalysatoren durch den Kohlenstoff umschlossen und so deaktiviert wurden. Das alles findet bei Temperaturen von bis zu 750 °C statt.

Anschließend werden Strukturdefekte oder Verunreinigungen durch Katalysatorenrückstände mittels Säurebehandlung oder Ultraschall gereinigt, da ansonsten physikalisches und chemisches Verhalten beeinflusst werden.¹³

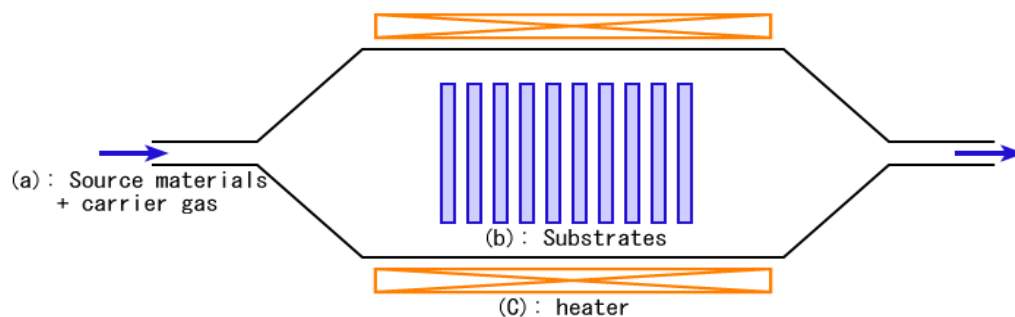


Abbildung 6: Schematische Darstellung des CVD-Verfahrens. Das kohlenstoffhaltige Gas wird in die vorgeheizte Umgebung bei Temperaturen um die 750 °C von links eingelassen und auf das Substrat mit den Katalysatoren gelenkt. Dabei scheidet sich Kohlenstoff aus der Gasphase und bildet an den Sekundär-Katalysatorenpartikeln Nanotubes. Rechts wird das Gas wieder ausgelassen.

Ohne einen Katalysator entstehen dabei Fullerene.¹⁴

¹² http://de.wikipedia.org/wiki/Chemische_Gasphasenabscheidung

¹³ W.Fahrner, „Nanotechnologie und Nanoprozesse – Einführung, Bewertung“, S.46 – 48, 4.1.2

¹⁴ <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/ThermalCVD.PNG>

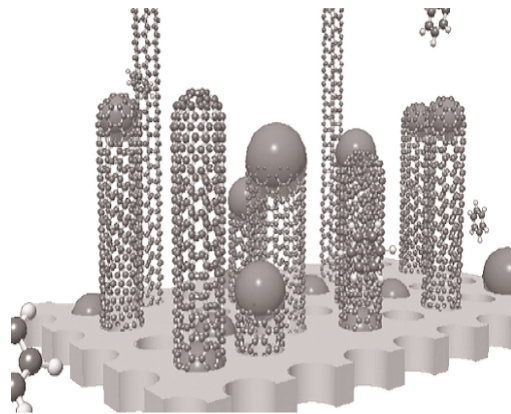


Abbildung 7: Hier noch einmal bildlich die Sekundärpartikel der Katalysatoren an denen sich, dem Durchmesser der Partikel entsprechend, die Single Walled Carbon Nanotubes bilden. Der Vorgang kommt zum Erliegen sobald der Katalysator von Kohlenstoff umschlossen ist.¹⁵

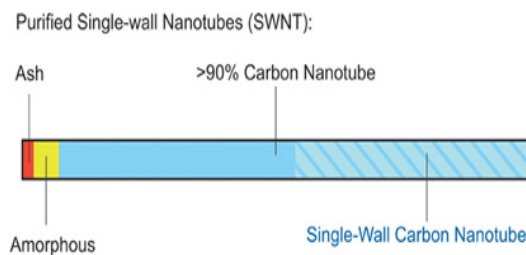


Abbildung 8: Das Bild zeigt die Ertragsrate pro Prozess der Firma SES Research. Mittlerweile können bis zu 90% an CNT's gewonnen werden. Von diesen 90% sind in etwa die Hälfte einwandige der Rest mehrwandige CNT's. Man erhält aber auch einen kleinen Teil amorpher Nanotubes sowie ca. 2% Abfall.¹⁶

¹⁵ Sabine Greßler, René Fries, Myrtil Simkó, Nano trust Dossiers, Nr.022, März 2011

¹⁶ <http://sesres.com/Nanotubes.asp>

2.1.1. PECVD-Verfahren

Generell unterscheidet man zwei CVD-Verfahren voneinander.

Zum einen gibt es das klassische, katalytisch Verfahren, dass schon erwähnt wurde, und die Plasma unterstützte chemische Gasphasenabscheidung, kurz PECVD. Das erzeugte Plasma, welches aus Ar/H₂ oder einem anderen erhitzten Argongasgemisch erzeugt wird, wird die Schichtabscheidung durch die zusätzlich entstehenden Ionen und Radikale angeregt und es sind niedrigere Temperaturen von Nöten welche sich nun bei 200°C – 500°C bewegen.¹⁷

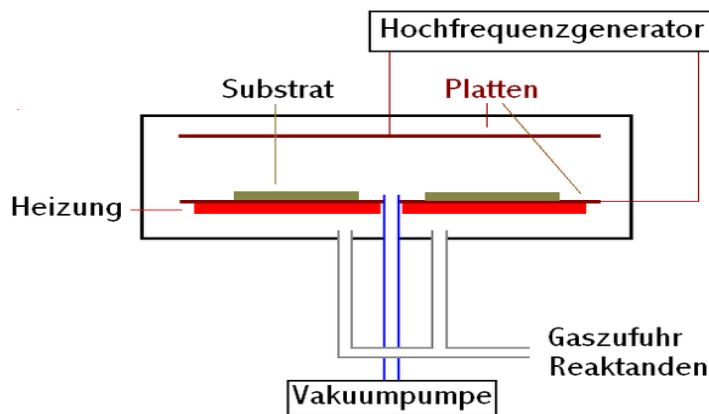


Abbildung 9: Dargestellt die Skizze eines PECVD = Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition. Die Kammer muss zwar ebenso vorgeheizt werden doch sind dank des von unten zugeführten Plasmas, welche durch den Hochfrequenzgenerator erhitzt wird, sind niedrigere Temperaturen vonnöten.¹⁸

¹⁷ W.Fahrner, „Nanotechnologie und Nanoprozesse – Einführung, Bewertung“, S.46 – 48, 4.1.2

¹⁸ <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/PICT0111.JPG>

2.2. Lichtbogenentladungsmethode

Ausbeute von SWNT's = ca. 30%

Die Lichtbogenentladungsmethode war die erste Methode mit der man CNT's gewann.

Durch einen Lichtbogen wird zwischen zwei Graphitelektroden ein Plasma erzeugt. Die Graphitelektroden enthalten bereits einen Katalysator der auch hier aus Eisen, Nickel oder Kobalt besteht und an denen sich im Laufe der Reaktion Nanotubes bilden.

Ohne Katalysatoren entstehen MWNT's.¹⁹

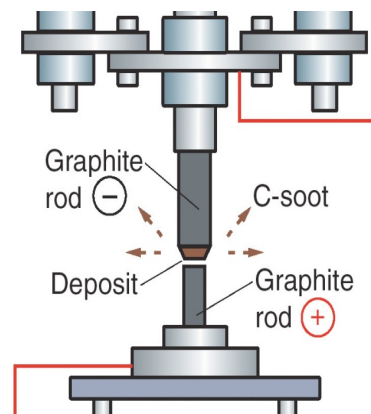


Abbildung 10: Bei diesem Verfahren erfolgt die Bildung der CNTs bei einer Bogenentladung in einer Lücke zwischen zwei Graphitelektroden. Auf der negativen Elektrode bilden sich kohlenstoffhaltige Ablagerungen aus Fullerenen, Graphitclustern und MWNTs. Besteht die Anode aus einem Metall-Graphit-Komposit können auch SWNTs mit dem Lichtbogenverfahren hergestellt werden.²⁰

¹⁹ http://www.uni-siegen.de/fb8/ac/hjd/lehre/ss09/acii_seminar/carbonanotubes-philipp_spitzer_korr.pdf

²⁰ http://mrsec.wisc.edu/Edetc/SlideShow/slides/nanotubes/growing_arc.html

2.3. Laserverdampfung

Ausbeute von SWNT's = ca. 20-40%

Beim Laserverfahren wird zunächst Graphit mit einem Laser bestrahlt und verdampft und es entsteht eine Gasphase.

Nun bilden sich an den Katalysatorpartikeln welche aus Eisen, Nickel oder Kobalt bestehen Nanotubes. Der Ofen in dem die Bildung von CNT's stattfindet muss jedoch auf ca. 1200 °C aufgeheizt werden.²¹

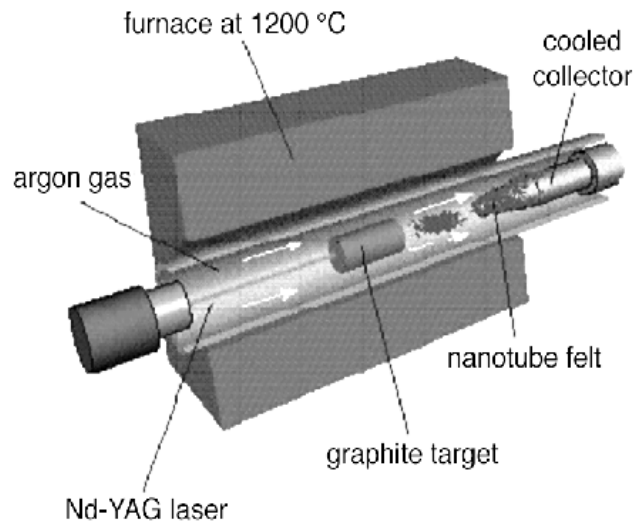


Abbildung 11: Darstellung des Laserverfahrens. Durch verdampfen von Graphit werden im Kondensat MWNT's, Fullerene und amorpher Kohlenstoff gewonnen. Wird ein Graphit/Metall-Komposit verwendet entstehen auch SWNT's.²²

²¹ http://www.uni-siegen.de/fb8/ac/hjd/lehre/ss09/acii_seminar/carbonanotubes-philipp_spitzer_korr.pdf

²² <http://ipn2.epfl.ch/CHBU/NTproduction1.htm>

2.4. Hausgemachte Nanopartikel

Oder etwa beim Blei gießen: Im Ruß einer Kerzenflamme, der am Boden des Löffels kondensiert, finden sich Nanotubes und Graphene.²³



*Abbildung 12: Erzeugung von Nanopartikeln beim Blei gießen.
Der Ruß am Löffel enthält Nanotubes und Graphene.²⁴*

2.5. Frühe unbewusste Erzeugung

Schwerter der Araber wurden aus Damaszenerstahl mittels eines besonderen Schmiedeverfahrens hergestellt. Für die Fertigung des Damaszener Stahls wurde so genannter Wootz aus Indien importiert. Wootz stellt die englische Version des Begriffes „ukku“ dar, welcher der Sprache von Karnataka (Kannada) und Andhra Pradesh (Telugu) entstammt und einfach „Stahl“ bedeutet. Dieser Stahl enthielt einen hohen Anteil an Kohlenstoff. Bei hohen Temperaturen bildet sich dadurch Eisencarbid.^{25 26}

Im Mittelalter wurde während der Herstellung von Goldrubinglas bei Kirchenfenstern ebenfalls Nanopartikel gebildet. Für die Rotfärbung sorgt Gold als Farbpigment in Nanoform.²⁷



*Abbildung 13: mittelalterlichen Kirchenfensters-
schon damals wurden unbewusst Nanopartikel in
Form von Gold als Farbpigmente verwendet.²⁸*

²³http://www.nanopartikel.info/files/content/dana/Dokumente/NanoCare/Publicationen/NanoCare_Broschuere.pdf

²⁴ <http://www.photocase.de/stock-fotos/79032-stock-photo-dunkel-holz-metall-brand-gefaehrlich-kerze.jpg>

²⁵ http://www.rp-online.de/wissen/technik/Nanotechnologie-im-Mittelalter_aid_376745.html

²⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Wootz>

²⁷http://www.verwaltungsakademie.ktn.gv.at/187476_DE-.pdf

²⁸<http://www.cdw-be.de/hdr/res/Images/hdr%20kirchenfenster%20dom%20schleswig1.jpg>

3. Anwendungen

3.1 Fullerene

3.1.1 Kommerzielle Anwendungen

Aufgrund der hohen Herstellungskosten finden sich bis dato sehr wenige kommerzielle Anwendungen. Einige sind hier beispielhaft aufgeführt.

Radikalfänger in Cremes

Mit Modifikationen in der Struktur, können Fullerene als Radikalfänger in Anti-Aging-Cremes eingesetzt werden. Hierzu wird das Molekül so verändert, dass sich dort nun mindestens ein ungepaartes Elektronenpaar befindet. Dieses soll dann Sauerstoffradikale binden, die für die Hautalterung verantwortlich sind.²⁹

Wegen der hohen Herstellungskosten sind die Produkte sehr teuer; beispielsweise beträgt der Preis für die Creme 'Mosbeau Skin Repair 100 Anti-Aging Solutin' rund 95\$ pro 20ml.³⁰

Organische Solarzellen

Wenn Fullerene mit Polymeren kombiniert werden, lassen sich daraus Solarzellen herstellen³¹.

Durch die Lichteinstrahlung wird das Polymer zur Elektronen-Produktion angeregt, diese werden dann durch die Fullerene abtransportiert.

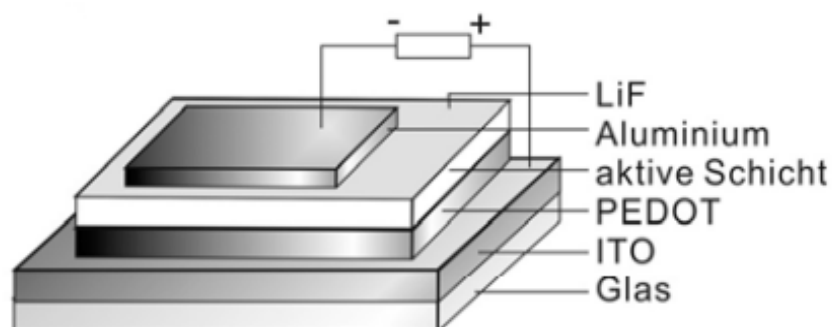


Abbildung 14: Aufbau einer Organischen Solarzelle³²

Bei dieser Art von Solarzellen ist ein theoretischer Wirkungsgrad von 40% erreichbar.³³ Bei herkömmlichen, auf Silizium basierenden Zellen, kann ein theoretischer Wirkungsgrad von 30% erreicht werden.³⁴ In der Praxis sind bei organischen Zellen bis zum jetzigen Zeitpunkt 10% und bei konventionellen etwa 20% erreicht wurden.³⁵ Der große Vorteil dieser Art von Solarzellen liegt in ihrer Flexibilität, wodurch sich das Herstellungsverfahren enorm vereinfacht. Die Zellen sind biegsam, was neue, vielseitige Einsatzmöglichkeiten schafft.

29 Anwendungen für neuartige Kohlenstoffpartikel, Heinzelmann, 2010, S18

30 https://shop.mosbeau.com.ph/index.php?main_page=advanced_search_result&search_in_description=1&keyword=skin%20repair&inc_subcat=0&sort=20a&zenid=rtvmd2qs2k811j9i43tboom94 Abgerufen 01.11.11

31 Neue Kohlenstoffmaterialien, Krüger, 2005, S 121

32 Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, 2005, S. 122

33 <http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/files/docs/pdf/teaching/lectures/talks/WS0708/Fullerene.pdf>

34 <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle> Abgerufen 01.11.11

35 http://www.solarserver.de/solarmagazin/solar-report_0807.html Abgerufen 01.11.11

'Light Harvesting'-Anwendungen

Die oben diskutierten Eigenschaften von Fulleren-Polymeren lassen sich auch für weitere 'Light Harvesting'-Anwendungen verwenden. Dazu zählen unter anderem Sensoren insbesondere Optische Fotosensoren für Bildgebungsverfahren. Ebenfalls in der Kommerziellen Verwendung befinden sich 'Elektrolumineszente-Materialien' auf Basis der Fullerene.³⁶

3.1.4. Schmierstoffe

Durch Zugabe von C_{60} zu Schmierstoffen steigert sich deren Leistung. Wenn beispielsweise der Flächendruck erhöht wird, sinkt der Haftreibungskoeffizient, während er bei klassischen Schmiermittel steigt.³⁷

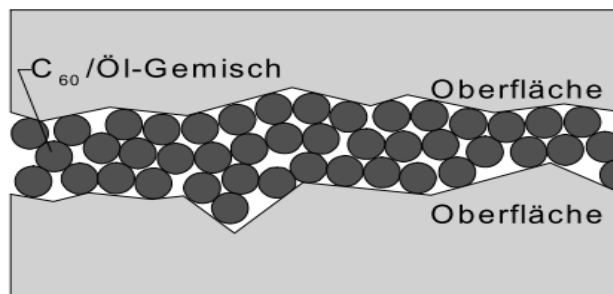


Abbildung 15: Schmierstoff auf Fullerenebasis³⁸

3.1.2 Labormaßstab

Neben den oben genannten kommerziellen Anwendungen werden viele mögliche weitere Anwendungen schon im Labor untersucht. Um einen Überblick zu geben was zur Zeit möglich ist, hier eine Auswahl der wichtigsten Laborversuche.

Antibakterielle Wirkung

Forscher des Georgia Institute of Technology haben herausgefunden, dass das C_{60} -Fulleren antibakterielle Wirkung auf Bakterien des Stamms Escherichia coli- und Bacillus subtilis hat.³⁹ Denkbare Einsatzfelder wären Reinigungsmittel oder antibakterielle Oberflächen.

Photodynamische Therapie

C_{60} und seine Derivate werden als sogenannte 'Sensibilisatoren' verwendet. Diese haben die Eigenschaft, bestimmte chemische Stoffe zu einer Reaktion zubewegen. Dadurch ist eine gezielte Veränderung der DNS möglich oder auch eine Zerstörung von Tumorgewebe denkbar.⁴⁰

Wasserstoffspeicher

Hydrofullerene z.B. $C_{60}H_{36}$ besitzen eine Wasserstoffspeicherkapazität von 4,8% der eigenen Masse. Zurzeit liegt dieser Wert unter der Wirtschaftlichkeitsgrenze.^{41,42}

36 Neue Kohlenstoff Materialien, Krüger, 2005, S.121

37 http://www.ifw.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Projekte/Fulleren_als_Schmierung.pdf Abgerufen 01.11.11

38 http://www.ifw.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Projekte/Fulleren_als_Schmierung.pdf Abgerufen 01.11.11

39 <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/news/254019.html> Abgerufen 01.11.11

40 Neue Kohlenstoff Materialien, Krüger, 2005 S.121

41 Neue Kohlenstoff Materialien, Krüger, 2005, S.121f

42 <http://www.ifw-dresden.de/offers/downloads/dateien/Flyer092000.pdf> Abgerufen 01.11.11

Anwendungen in der Medizin

Angedacht sind hier Röntgenkontrastmittel und Radiotracer auf Fullerenbasis. Der Vorteil liegt vor allem in der geringeren Toxizität gegenüber herkömmlichen Mitteln. Genauere Aussagen zur Toxizität sind jedoch noch nicht belegt.

Diamantenherstellung

Mit Hilfe einer 'Kohlenstoff-Zwiebel-Synthese' lassen sich hochreine Diamanten herstellen. Da zur Zeit aber mit dieser Methodik nur kleine Diamanten züchten lassen, wird sie nicht kommerziell verwendet.⁴³

Supraleiter

Unter Zuhilfenahme von Alkali-Metallen lassen sich Fullerene als Supraleiter verwenden. Bei Standardbedingungen verlieren die Fulleren-Modifikationen ab einer Temperatur von -245°C ihren elektrischen Widerstand. Werden nun die Räume zwischen den Molekülen vergrößert, steigt der Temperaturpunkt, an dem das Material seine elektrische Leitfähigkeit verliert, auf -156°C an. Kupferoxide verlieren zwar schon ab einer Temperatur von -140°C ihren elektrischen Widerstand, hingegen transportieren sie den Strom nur in einer und nicht in drei Dimensionen. Daneben sind die Fullerenen basierenden Supraleiter billiger und leichter formbar.⁴⁴

Inhabitierung des HIV-Virus

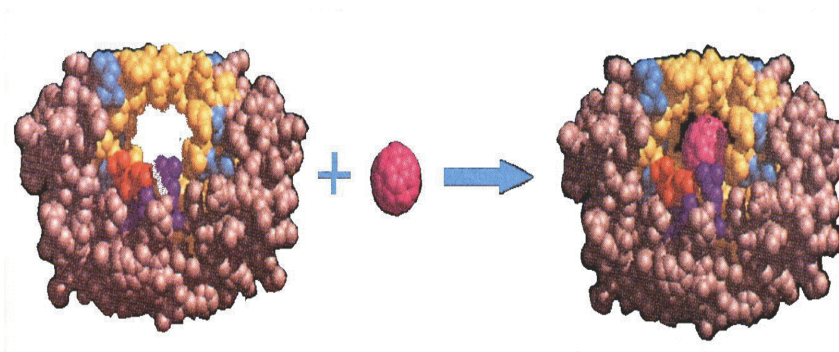


Abbildung 16: HIV-Virus und Fulleren verschmelzen⁴⁵

Das HIV-Virus besitzt etwa in der Mitte einen aktiven Teil, in dem sich die meisten funktionellen Gruppen befinden. Dort hinein passt genau das C_{60} -Fulleren. Durch die Fixierung an dieser Stelle würde die Funktion des Virus fast komplett blockiert. Probleme bestehen aber darin, das Molekül an die richtige Stelle zu bekommen, als auch in der Fixierung.

Bisher wurden noch keine Nachweise erbracht, dass dies auch in der Praxis funktioniert.⁴⁶

⁴³ <http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/files/docs/pdf/teaching/lectures/talks/WS0708/Fullerene.pdf> Abgerufen 01.11.11

⁴⁴ <http://www.spektrumverlag.de/artikel/828092> Abgerufen 01.11.11

⁴⁵ <http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/files/docs/pdf/teaching/lectures/talks/WS0708/Fullerene.pdf> Abgerufen 01.11.11

⁴⁶ <http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/files/docs/pdf/teaching/lectures/talks/WS0708/Fullerene.pdf> Abgerufen 01.11.11

3.2 Nanotubes

3.2.1 Anwendungen

Materialien und Eigenschaften	Anwendungsbereiche
<p>Kunststoff-Granulate („Masterbatches“) mit CNTs als Additiv zur Herstellung elektrostatisch ableitfähiger thermoplastischen Kunststoffe; Gewichtsreduktion, Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit</p>	<p>Elektronik: Verpackungsmaterial für Transport und Lagerung für integrierte Schaltkreise („IC-Trays“); Prüfsockel für Microchips;</p> <p>Transport- und Lagerungsbehälter für Halbleiterscheiben;</p> <p>Automobil: Treibstoffsystem-Komponenten, Kotflügel, Spiegelgehäuse, Türgriffe;</p>
<p>Silikonharze mit CNTs als Additive für Farben und Lacke; Erhöhung der Feuerbeständigkeit und Kratzfestigkeit; Oberflächenbehandlung von Metall, Beton, Holz, Ziegel und Holzfasernplatten;</p>	<p>Brandschutz: Flammensperre für Schaumstoff; Beschichtung von Kabeln und Drähten;</p> <p>Anti-Haftbeschichtung für Schiffe: gegen Aufwuchs von marinen Organismen (z. B. Muscheln)</p>
<p>Epoxidharze (duroplastische Kunststoffe) mit CNTs; Erhöhung der Strapazier- und Bruchfestigkeit, Antistatik; Gewichtsreduktion</p>	<p>Sportartikel: Fahrradrahmen, Hockey-, Tennis- und Golfschläger, Schi, Kajaks; Sportpfeile</p> <p>Schifffahrt: Masten und andere Teile von Segelschiffen;</p> <p>Energietechnik: Beschichtung von Rotorblättern von Windkraftanlagen</p> <p>Industriemaschinen: Industrieroboter-Arme</p>

Abbildung 17: Tabelle über Bereiche in denen bereits Nanotubes verwendet werden. ⁴⁷

⁴⁷ Sabine Greßler, René Fries, Myrtil Simkó, Nano trust Dossiers, Nr.022, März 2011

3.2.2 Forschung und Entwicklung

Materialien und Eigenschaften	Anwendungsbereiche
Elektrisch leitfähige Tinten ; bessere Leitfähigkeit und mechanische Beständigkeit	Energietechnik : Solarzellen
Bipolar- und Gasdiffusionsschichten	Energietechnik : Brennstoffzellen
Elektroden aus CNTs	Energietechnik : Lithium-Ionen-Batterien mit besserer Speicherkapazität;
Membrane mit CNT; höhere Energieeffizienz und Produktivität	Umweltechnik : Meerwasserentsalzung, Gastrennung von CO ₂
Ultraleichte Verbundwerkstoffe	Luft- und Raumfahrt, Automobilherstellung
Hochfeste Partikelschäume mit CNTs; Steigerung der Absorbtiionsfähigkeit von Deformationsenergie	Automobil : Erhöhung der Sicherheit von Karosserieteilen;
Kunststoffteile und Dichtungen auf Basis von Elastomeren mit CNTs; bessere Eigenschaften in Bezug auf Reibung, Schmierung und Verschleiß	Bauindustrie
Metalle mit CNTs	Automobil : Mechanisch hoch belastete Bauteile
Ultrahochleistungsbeton mit CNTs; Erhöhung der Stabilität und Elastizität	Bauindustrie : z. B. Hochhäuser, Brücken
Arzneimittelunterstützung : Biokompatible CNTs für den zielgerichteten Arzneimitteltransport im menschlichen Körper („Drug delivery“)	Medizin : z. B. Krebstherapie
CNT-verstärkte Polymerkompositfasern und -gewebe ; Fasern aus CNTs; Verbesserung der Widerstandsfähigkeit; Leitfähigkeit, Hydrophobie, Flammhemmung	Textilien : Antistatische und elektrisch leitfähige Textilien („Smart Clothes“); kugelsichere Westen, wasserabweisende und flammhemmende Textilien
Transistoren aus CNTs: schnellere und leistungsfähigere Schaltkreise	Elektronik : Computerchips

Abbildung 18: Tabelle die zeigt in welchen Bereichen momentan geforscht und entwickelt wird.⁴⁸

⁴⁸ <http://epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier022.pdf>

3.2.3 Preise

Preise am Beispiel der Firma SES Research:

Purified Multi-Wall Nanotube	Price (\$U.S.)
Outer diameter, <10nm, Length 5-15µm, 1 gram	\$150.00

Purified Single-Wall Nanotube	Price (\$U.S.)
S-Purified SWNT, Length 1-5um, 1 gram	\$250.00

Abbildung 19: Preise der Firma SES Research über Multiwalled und Single Walled Nanotubes⁴⁹

⁴⁹ <http://sesres.com/Nanotubes.asp>

4. Ökobilanz

4.1 Fullerene

Eine ökologische Bewertung des Moleküls Fulleren und dessen Derivate ist sehr schwierig. Zu einen, weil es sehr wenige Studien und Untersuchungen bezüglich der allgemeinen Umweltverträglichkeit gibt, als auch der teilweise großen Differenzen in den Eigenschaften dieser Molekülgruppe. Während ein Molekül fast völlig unreaktiv sein kann, ist ein sehr ähnliches hochreaktiv.

Deshalb ist eine differenzierte Betrachtungsweise notwendig. Im Folgenden wird hier bevorzugt auf die Aspekte der Herstellung und auf den Einsatz des C₆₀-Moleküls sowie einiger weniger Derivate.

Diese Bilanz ist weder vollständig noch fehlerfrei. Aber es wird versucht, wichtige wissenschaftliche Erkenntnisse von Vermutungen und Spekulationen zu trennen.

4.1.1 Herstellung

Als Kohlenstoffquelle bei der Fulleren-Herstellung dienen verschiedene Kohlenstoffmodifikationen wie z.B. Graphen oder 'Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe'.

Hier eine Liste der gebräuchlichsten Kohlenstoffquellen⁵⁰:

Graphen

Graphen ist als Stoff generell als ungefährlich einzustufen. Einordnung der Herstellungsbedingungen durch Projektgruppe 'Graphen'.

Benzol

Aufgrund des niedrigen Flammpunktes von -11°C ist Benzol sehr leicht entzündlich sowie explosionsgefährdet. Ab einem Luftvolumenanteil von 2% ist Benzol tödlich.⁵¹ Daraus ergeben sich bei Herstellungsverfahren, die Benzol als Kohlenstoffquelle benutzen, auch Gefahren für den Menschen.

Hergestellt wird Benzol hauptsächlich aus Kohle oder Rohöl⁵², was sich negativ auf die Ökobilanz auswirkt.

Toluol

Toluol wirkt erbgutverändernd, fortpflanzungsgefährdend, nerven- und nierenschädigend. Bei Einatmung können verschiedenartig, teilweise gefährliche Wirkungen auftreten.⁵³ Deshalb ist Toluol ein sehr gefährlicher Stoff. Wird er als Kohlenstoffquelle verwendet, ergibt sich auf Grund der oben genannten Punkte die schlechteste Ökobilanz.

50 Neue Kohlenstoffmaterialien, Krüger, 2005, S49 ff

51 http://de.wikipedia.org/wiki/Benzol#Sicherheitstechnische_Kenngr.C3.B6.C3.9Fen Abgerufen 01.11.11

52 http://de.wikipedia.org/wiki/Benzol#Sicherheitstechnische_Kenngr.C3.B6.C3.9Fen Abgerufen 01.11.11

53 <http://de.wikipedia.org/wiki/Toluol#Sicherheitshinweise> Abgerufen 01.11.11

Methan

Methan ist leicht entzündlich und kann ab einer Konzentration von 4,4 % in der Luft zu einer Explosion führen. Obwohl das Einatmen von erhöhten Konzentrationen durch Sauerstoff-Verdrängung zu Problemen führen kann, ist Methan als ungefährlich einzustufen.⁵⁴

Methan kann zum Beispiel durch Biogasanlagen oder Methanisierung umweltverträglich hergestellt werden.

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

PAKs sind u.a. krebserregend, fruchtschädigend und beeinträchtigen die Fortpflanzung. Außerdem werden sie sehr leicht in den Körper aufgenommen.

In die Umwelt eingebracht, zeigen sie eine Persistenz sowie Toxizität.

Da die PAKs thermisch behandelt werden, um die gewünschten Fullerene zu erhalten, besteht die Gefahr einer Austragung in die Umwelt durch die Abluft.

Hergestellt werden sie vorwiegend aus Kohle und Erdöl.⁵⁵

Neben den teilweise sehr kritisch zu sehenden Edukten, ist der hohe Energieaufwand zu beurteilen. Die Effizienz der Herstellungsverfahren ist sehr unterschiedlich.

Der geringste Wirkungsgrad fängt bei 0,003 % an, doch selbst die effizientesten Verfahren haben nur eine Anreicherung im Endprodukt von ungefähr 15 %.

Alle Verfahren haben gemeinsam, dass sie stets sehr viel Energie erfordern, entweder thermische oder Elektrische.

4.1.2 Wirkung auf den Mensch

Die Ursprungsform von Fullerene (C₆₀, C₇₀, etc) sind aufgrund ihrer geringen Reaktivität ungefährlich. Wenn sie sich zu größeren Mengen zusammenfinden, kann eine Toxizität ähnlich der von Asbest auftreten. Diese ist allerdings weniger gefährlich als von Asbest selber ausgehend.⁵⁶

Aufgrund der vielen, verschiedenen Modifikation von Fullerenen z.B. als Radikalfänger, kann eine Gefährdung grundsätzlich bestehen.

Fullerene besitzen die Eigenschaft körpereigene Barrieren zu überwinden und sich so im ganzen Organismus zu verteilen.⁵⁷ So können sie auch von einer Mutter auf das ungeborene Kind übertragen werden..

Zurzeit liegen keine weiteren Daten vor.

⁵⁴ http://de.wikipedia.org/wiki/Methan#Umgang.2C_Gefahren_und_Sicherheit Abgerufen 01.11.11

⁵⁵ http://de.wikipedia.org/wiki/Polycyclische_aromatische_Kohlenwasserstoffe#Wirkung_bei_Menschen Abgerufen 01.11.11

⁵⁶ http://www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/79_ZTC-Studie_CNT.pdf Abgerufen 01.11.11

⁵⁷ <http://www.g-o.de/wissen-aktuell-10774-2009-11-09.html> Abgerufen 01.11.11

4.1.3 Wirkung auf die Umwelt

Auf bestimmte Bakterienstämme wirken C_{60} -Moleküle antibakteriell, weshalb sie nicht in reiner Form und in größeren Mengen in die Umwelt eingebracht werden sollten.⁵⁸

Auch hier liegen keine weiteren Daten vor. Erste Ergebnisse der Gruppe 'NanoCare' sollen ab 2013 verfügbar sein.⁵⁹

4.1.4 Entsorgung

Zur Zeit gelten keine gesonderten Vorschriften zur Entsorgung. Entsprechend des EG-Sicherheitsdatenblatts der Firma Hedinger sind C_{60} -Fullerene als Sondermüll zu entsorgen.⁶⁰

Bei der Verbrennung besteht die Gefahr, dass nicht alle Moleküle zerstört und über die Abluft in die Umwelt eingebracht werden.

4.2. Gefahren/Risiken in Bezug auf Nanotubes

Das chemisch-pharmazeutische Unternehmen Bayer AG nahm im Jahr 2010 die weltgrößte Anlage für die Produktion von Nanotubes in Betrieb. Sie umfasst eine Produktionsleistung von rund 200 Tonnen pro Jahr.

Was jedoch weniger bekannt sein dürfte ist die Tatsache, dass diese Anlage unter die Kategorie „Versuchsbetrieb“ fällt und somit von einem regulären Zulassungsverfahren ausgeschlossen wurde. Es werden also bereits heute in Deutschland riesige Mengen an SWNT's und MWNT's produziert ohne deren gesundheitliche und umweltbelastende Einflüsse zu kennen.

Es sein noch erwähnt, dass das Unternehmen eine weitaus größere Anlage mit einem Produktionsvolumen von etwa 3000 Tonnen im Jahr plant. Diese soll aber laut Bayer AG dann einem regulären Zulassungsverfahren unterliegen.^{61 62}



Abbildung 20: „Baytubes“ sind Nanotubes der Firma Bayer. Zu sehen ist, dass die SWNT's in Form von Pulver gelagert und verkauft werden.⁶³

58 Environmental Science & Technology, Ausgabe 39, S.4307 Abgerufen 01.11.11

59 <http://www.nanopartikel.info/cms/Projekte> Abgerufen 01.11.11

60 http://www.hedinger.de/uploads/media/Fulleren_C60_v002.pdf Abgerufen 01.11.11

61 <http://www.cbgnetwork.org/3471.html>

62 <http://www.nrhz.de/flyer/beitrag.php?id=16156>

63 <http://www.jobwerx.com/images/bayer-949719-baytubes-c150-hr.jpg>

4.2.1. Toxizität

Anfangs, nach der Entdeckung der CNT's, wurden gesundheitliche Auswirkungen auf Menschen nicht untersucht. Das hatte vor allem mit den nur geringen Mengen zu tun und weil diese ausschließlich im Labor zu hohen Kosten hergestellt wurden.

Als jedoch durch das CVD-Verfahren(um 2000) die Produktion größerer Mengen möglich wurde, wurden auch die Rufe nach einer toxikologischen Kontrolle lauter.

Besonders die Ähnlichkeit langer, nadelförmiger Carbon Nanotubes mit Asbestfasern in Sachen Gestalt und Beständigkeit geben zu denken. So wurde anhand von Labormäusen festgestellt, dass eben diese speziellen Nanotubes auch analog zu den Asbestfasern Entzündungen im Lungengewebe hervorrufen.^{64 65}

Dabei können Nanopartikel auf unterschiedlichen Wegen in den Körper gelangen:

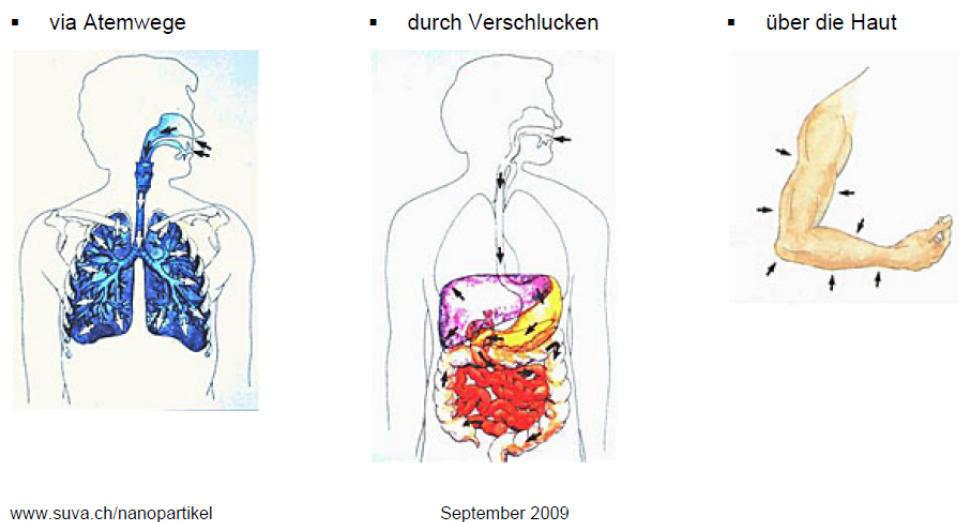


Abbildung 21: Wege auf denen Nanopartikel in den Körper gelangen können. Viele Auswirkungen von Nanopartikeln auf den menschlichen Körper sind noch weitestgehend unerforscht.⁶⁶

64 <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,554383,00.html>

65 <http://epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier024.pdf>

66 http://www.suva.ch/nanopartikel_an_arbeitsplaetzen.pdf

4.2.2. Umweltauswirkungen

Es fehlen in der Regel auch Analysen und Bewertungen über Ressourcen und Energieverbrauch bei der Herstellung in den Beschreibungen nanotechnologischer Produkte.

Oft werden die Nachteile aufgrund der überwältigend scheinenden Vorteile schlichtweg nicht beachtet. Siehe am Beispiel der Bayer AG und seinem „Versuchsbetrieb“.

Umweltorganisationen, wie z.B. „Friends of Earth“ warnen sogar vor höheren Energie – und Umweltkosten, leeren Versprechen der Industrie und davor, dass viele Behauptungen über die Umweltbilanz der Nanotechnologie nicht mit der Realität übereinstimmen.

So wird nach einer Schätzung behauptet, dass pro Kilogramm produziertem CNT's 0,1 – 1 Terajoule (variiert da sich Herstellungsmethoden unterscheiden) verbraucht werden.

Um das zu verdeutlichen: 1 TJ entspricht der Energiemenge die in 167 Barrel Erdöl vorkommen. Das wiederum entspricht 26.500 Liter!

Somit wäre die Nanotechnologie eines der energieintensivsten Technologien die uns bekannt ist. ^{67 68}

TABLE 3
ESTIMATED SPECIFIC ENERGY REQUIREMENTS AND
PROCESS RATES FOR SYNTHESIS OF CNTs

Process Name	Product	Process Rate (kg/h)	Synthesis Energy Requirements (J/kg)	Reference
HiPco Process	SWNT	4.50E-04	3.18E+10	Healy et al (2008) AND Isaacs et al (2008)
Arc Ablation	SWNT	8.10E-05	8.73E+10	
CVD Process	SWNT	9.80E-06	2.76E+11	
Vapor-Grown CNF Process	CNF	1.30E-02	3.13E+09	Khanna et al (2008)
Vapor-Grown CNF Process	CNF	1.80E-02	2.22E+09	
Vapor-Grown CNF Process	CNF	5.20E-02	7.61E+08	
HiPco Process	SWNT	1.38E-06	5.34E+11	Nikolaev et al (1999)
HiPco Process	SWNT	4.50E-04	8.11E+10	Bronikowski et al (2001)
HiPco Process	SWNT	4.50E-04	2.41E+10	Smalley et al (2007)

Abbildung 22: Tabelle über den Energieverbrauch pro Kilogramm. HiPCO Process bedeutet: „High-Pressure Carbon Monoxide“. Bei diesem Prozess erfolgt die Produktion von SWNTs unter Einsatz von Fe(CO)5 als Katalysator und CO als Kohlenstoffquelle.⁷⁰

⁶⁷http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/nanotechnologie/20101116_nanotechnologie_klimareport.pdf

⁶⁸http://www.foeeurope.org/publications/2010/nano_climate_energy_nov2010.pdf

⁶⁹[http://de.wikipedia.org/wiki/Größenordnung_\(Energie\)#Terajoule_.E2.80.93_TJ](http://de.wikipedia.org/wiki/Größenordnung_(Energie)#Terajoule_.E2.80.93_TJ)

⁷⁰ International Symposium on Sustainable Systems and Technologies, Washington D.C., May 16-19, 2010; Minimum Exergy Requirements for the Manufacturing of Carbon Nanotubes; Timothy G. Gutowski ; Seite 4

5. Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Erforschung von Fullerenen und Nanotubes einen großen Schritt in der Entwicklung von innovativen Materialien darstellt.

Es ergeben sich viele neue Möglichkeiten Probleme zu beheben, aber auch schon auf dem Markt befindliche Materialien und Produkte zu verbessern.

Der Schwerpunkt der Forschungen muss aber in den nächsten Jahren darauf liegen, eine wirtschaftliche und energiesparende Produktionsmethode zu entwickeln. Nur so können marktfähige Preise erzielt und somit der Massenmarkt geöffnet werden.

Ebenso ist es für die Massenanwendung unerlässlich, konsequent eine gesundheitliche Bewertung dieser Produkte vorzunehmen. Die Projekte der NanoCare Gemeinschaft haben dabei sehr gute Ansätze. Die meisten Ergebnisse werden bedauerlicher Weise erst im Laufe des Jahres 2013 erwartet.

Obwohl große Hoffnungen in den Bereich der Fullerenmedizin gesteckt werden, ist es fraglich, ob die gesetzten Ziele erreicht werden können. In gewissen Bereichen der Nuklearmedizin bestehen jedoch sehr gute Aussichten. Hier wird es aber wegen der Zulassungsverfahren noch Jahre dauern bis eine breite Anwendung statt finden kann.

Großes Potential besitzen Kompositmaterialien mit Nanotubes in der Luftfahrt und Autoindustrie.

Unter ökologischen Gesichtspunkten und mit den entsprechenden Edukten können Fullerene und Nanotubes 'sauber' hergestellt werden. Außerdem muss die Austragung in die Umwelt während der Produktion verhindert werden.

Mit Sicherheit wird die Forschung über Fullerene und Nanotubes in den nächsten Jahren noch für viel Gesprächsstoff sorgen. Sowohl durch viele neue Anwendungsmöglichkeiten, als auch durch die Diskussion über die gesundheitlichen Aspekte, die leider oft auf mangelndem Wissen und auf wagen Aussagen basiert. Eine wirkliche Verbesserung ist erst zu erwarten, wenn besagte Studien veröffentlicht werden.

Literaturverzeichnis

- Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, 2005
- https://shop.mosbeau.com.ph/index.php?main_page=advanced_search_result&search_in_description=1&keyword=skin%20repair&inc_subcat=0&sort=20a&zenid=rtvmd2qs2k811j9i43tboom94
- <http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/files/docs/pdf/teaching/lectures/talks/WS0708/Fullerene.pdf>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle>
- http://www.solarserver.de/solarmagazin/solar-report_0807.html
- http://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Projekte/Fulleren_als_Schmierung.pdf
- <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/news/254019.html>
- <http://www.ifw-dresden.de/offers/downloads/dateien/Flyer092000.pdf>
- <http://www.spektrumverlag.de/artikel/828092>
- http://de.wikipedia.org/wiki/Benzol#Sicherheitstechnische_Kenngr.C3.B6.C3.9Fen
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Toluol#Sicherheitshinweise>
- http://de.wikipedia.org/wiki/Methan#Umgang.2C_Gefahren_und_Sicherheit
- http://de.wikipedia.org/wiki/Polycyclische_aromatische_Kohlenwasserstoffe#Wirkung_bei_Menschen
- http://www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/79_ZTC-Studie_CNT.pdf
- Environmental Science & Technology, Ausgabe 39, S.4307
- <http://www.nanopartikel.info/cms/Projekte>
- http://www.hedinger.de/uploads/media/Fulleren_C60_v002.pdf
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffnanoröhren>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Meter>
- Sabine Greßler, René Fries, Myrtil Simkó, Nano trust Dossiers, Nr.022, März 2011
- W.Fahrner, „Nanotechnologie und Nanoprozesse – Einführung, Bewertung“, S.46 – 48, 4.1.2
- <http://spectrum.ieee.org/image/1952588>
- http://edoc.ub.uni-muenchen.de/8522/1/Dupraz_Christian.pdf
- http://de.wikipedia.org/wiki/Chemische_Gasphasenabscheidung
- <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/ThermalCVD.PNG>
- <http://sesres.com/Nanotubes.asp>
- <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/PICT0111.JPG>
- http://www.uni-siegen.de/fb8/ac/hjd/lehre/ss09/acii_seminar/carbonanotubes-philipp_spitzer_korr.pdf
- http://mrsec.wisc.edu/Edetc/SlideShow/slides/nanotubes/growing_arc.html
- <http://ipn2.epfl.ch/CHBU/NTproduction1.htm>
- http://www.nanopartikel.info/files/content/dana/Dokumente/NanoCare/Publikationen/NanoCare_Broschuere.pdf
- <http://www.photocase.de/stock-fotos/79032-stock-photo-dunkel-holz-metall-brand-gefaehrlich-kerze.jpg>
- http://www.rp-online.de/wissen/technik/Nanotechnologie-im-Mittelalter_aid_376745.html
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Wootz>
- http://www.verwaltungsakademie.ktn.gv.at/187476_DE-.pdf
- <http://www.cdw-be.de/hdriges/Images/hdr%20kirchenfenster%20dom%20schleswig1.jpg>
- <http://sesres.com/Nanotubes.asp61> <http://www.cbgnetwork.org/3471.html>
- <http://www.nrhz.de/flyer/beitrag.php?id=16156>
- <http://www.jobwerx.com/images/bayer-949719-baytubes-c150-hr.jpg>

- <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,554383,00.html>
- <http://epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier024.pdf>
- http://www.suva.ch/nanopartikel_an_arbeitsplaetzen.pdf
- http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/nanotechnologie/20101116_nanotechnologie_klimareport.pdf
- http://www.foeeurope.org/publications/2010/nano_climate_energy_nov2010.pdf
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Größenordnung_\(Energie\)#Terajoule_.E2.80.93_TJ](http://de.wikipedia.org/wiki/Größenordnung_(Energie)#Terajoule_.E2.80.93_TJ)
- International Symposium on Sustainable Systems and Technologies, Washington D.C., May 16-19, 2010; Minimum
- Exergy Requirements for the Manufacturing of Carbon Nanotubes; Timothy G. Gutowski ; Seite 4

Bildverzeichnis

- Abbildung 1: Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, S. 38
- Abbildung 2: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6e/Football_%28soccer_ball%29.svg/450px-Football_%28soccer_ball%29.svg.png
- Abbildung 3: Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, S. 42
- Abbildung 4: Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, S. 48
- Abbildung 5: Sabine Greßler, René Fries, Myrtil Simkó, Nano trust Dossiers,Nr.022, März 2011
- Abbildung 6: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/ThermalCVD.PNG>
- Abbildung 7: Sabine Greßler, René Fries, Myrtil Simkó, Nano trust Dossiers,Nr.022, März 2011
- Abbildung 8: <http://sesres.com/Nanotubes.asp>
- Abbildung 9: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/PICT0111.JPG>
- Abbildung 10: http://mrsec.wisc.edu/Edetc/SlideShow/slides/nanotubes/growing_arc.html
- Abbildung 11: <http://ipn2.epfl.ch/CHBU/NTproduction1.htm>
- Abbildung 12: <http://www.photocase.de/stock-fotos/79032-stock-photo-dunkel-holz-metall-brand-gefaehrlich-kerze.jpg>
- Abbildung 13: Krüger, Neue Kohlenstoffmaterialien, 2005, S. 122
- Abbildung 14: http://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Projekte/Fulleren_als_Schmierung.pdf
- Abbildung 15: <http://www.unisaarland.de/fak7/hartmann/files/docs/pdf/teaching/lectures/talks/WS0708/Fullerene.pdf>
- Abbildung 16: Sabine Greßler, René Fries, Myrtil Simkó, Nano trust Dossiers,Nr.022, März 2011
- Abbildung 17: <http://epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier022.pdf>
- Abbildung 18: <http://sesres.com/Nanotubes.asp>
- Abbildung 19: <http://www.jobwerx.com/images/bayer-949719-baytubes-c150-hr.jpg>
- Abbildung 20: http://www.suva.ch/nanopartikel_an_arbeitsplaetzen.pdf
- Abbildung 21: <http://epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier022.pdf>
- Abbildung 22: International Symposium on Sustainable Systems and Technologies, Washington D.C., May 16-19, 2010; Minimum Exergy Requirements for the Manufacturing of Carbon Nanotubes; Timothy G. Gutowski ; Seite 4

Alle Weblinks wurden das letzte mal am 01. November 2011 abgerufen.