

FRAUNHOFER-ALLIANZ NANOTECHNOLOGIE

Karl-Heinz Haas  
Günter Tovar  
(Hrsg.)

# ANGEWANDTE NANOTECHNOLOGIE

**BEISPIELE AUS DER FRAUNHOFER-ALLIANZ NANOTECHNOLOGIE**

FRAUNHOFER VERLAG

# VORWORT

Hypes sind alltägliche Begleiter in unserem modernen Leben. Darin spiegelt sich die Hoffnung auf die Lösung vieler Probleme der Menschheit durch neue Technologien. Nanotechnologie (NT) – das Nutzen kleinster Strukturen in technischen Anwendungen – ist auch ein solcher Hype, der wie alle Hypes den Gardner-Zyklus vom ersten Auftauchen, über Erwartungen, überzogene Erwartungen, erste Enttäuschungen bis zum Stadium der produktiven Umsetzung der Ursprungsideen geht. Nanotechnologie ist aufgrund ihrer Vielfalt auf unterschiedlichen Punkten des Gardner Zyklus (siehe Abb.01). Das vorliegende Buch soll aufzeigen wie eine anwendungsorientierte Forschungsgesellschaft mit den vielfältigen Möglichkeiten der Nanotechnologie umgeht und wie die »Mühen der Ebenen« zu Anwendungen der Nanotechnologie führen können.

Dieses Buch bietet eine verständliche Einführung in die »Nano-Revolution«. Autoren aus den Instituten der Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie beschreiben neue Materialien und Technologien, die an der Schnittstelle zwischen Molekül-, Mikro- und Makrowelt entstanden sind. Sie beziehen auch Stellung zu Themen wie z. B. die Sicherheit beim Umgang mit Nanomaterialien. Erfolgreiche Produktentwicklungen und Perspektiven für weitere Entwicklungen in unterschiedlichsten Branchen werden dargestellt. Trotz allem wird auch dieses Buch nur eine Auswahl treffen können, die nicht alle Aspekte und Möglichkeiten der Nanotechnologie (NT) im Detail darstellen kann. Der interessierte Leser wird aber durch die Fülle der Referenzen schnell den Weg zu seinem Interessensgebiet finden, sollte es in den vorliegenden Kapiteln nicht zu finden sein.

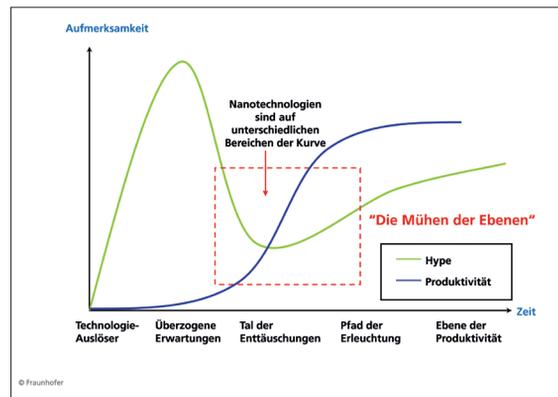


Abb. 0.1: Hypezyklen von Technologieentwicklungen

Aus dem Inhalt

- Einführung und Übersicht
- Erst rechnen, dann machen
- Strukturierungsverfahren
- Elektronik
- Neuartige Solarzellen
- Sensoren: Sinnesorgane der Dinge
- Nanopartikelsynthesen mittels Flow-Chemistry
- Plasmapolymerisation – für funktionale Nanoschichten
- Nanotechnologie für Beschichtungen aus flüssiger Phase
- Polymerbasierte Nanokomposite
- Hybridpolymere
- Nanoskaliges Hartmetall: Fiktion oder Realität?
- Nanomaterialien in Verpackungen und Barrierefolien
- Nanobiotechnologische Materialien und Beschichtungen für die Medizintechnik
- Nanomaterialien für elektrische Energiespeicher
- Sicherheit beim Umgang mit Nanomaterialien

- Fraunhofer NanoNavigator – Lösungsfinder im Universum der Nanotechnologie
- Blick in die Zukunft – Foresight und Politikberatung

Die Fraunhofer-Allianz Nanotech bündelt die Aktivitäten verschiedener Institute der Fraunhofer-Gesellschaft auf dem Gebiet der NT. Diese Kooperation deckt die gesamte Wertschöpfungskette von der anwendungsorientierten Forschung bis zur Unterstützung bei der industriellen Umsetzung ab.

Auch wenn zukünftig viele Entwicklungen nicht mehr unter dem Überbegriff Nanotechnologie eingeordnet werden, die Möglichkeiten der Nanoskaligkeit und die technischen Verfahren zu deren Nutzung werden in immer mehr industriellen Anwendungen Eingang finden – Nano als Handwerkzeug der modernen Technik wird bleiben.

Die Herausgeber

**Dr. Karl-Heinz Haas,**

Leiter der Geschäftsstelle der Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie und stellvertretender Sprecher

**Prof. Dr. Günter Tovar,**

Sprecher der Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einführung und Übersicht</b> .....	<b>18</b>
1.1 Definition und Ursprung des Begriffes Nanotechnologie/Nanomaterialien .....	20
1.2 Geschichtliche Entwicklung der Nanotechnologie: Ein kurzer Abriss .....	22
1.3 Dimensionalität von Nanosystemen .....	24
1.4 Größenabhängige Eigenschaften von Nanomaterialien .....	25
1.5 Herstellungsverfahren für Nanostrukturen.....	29
1.6 Anwendungsbereiche und Märkte der Nanotechnologie.....	32
1.7 Entwicklungsstufen der Nanotechnologie .....	32
1.8 Internationale Forschungsförderung und NT-Investments .....	35
1.9 Möglichkeiten der wirtschaftlichen Wertschöpfung durch Nanotechnologien.....	36
1.10 Gesellschaftliche Auswirkungen und Akzeptanz neuer Technologien .....	37
1.11 Nanotechnologien in der Fraunhofer-Gesellschaft: Die Allianz Nanotechnologie.....	38
Literatur und Referenzen.....	39
Autoren.....	42
<b>2 Erst rechnen, dann machen</b> .....	<b>44</b>
2.1 Simulationen in der Nanotechnologie .....	46
2.2 Kohlenstoffmaterialien.....	47
2.2.1 Ultraglattheit von DLC-Schichten.....	48
2.2.2 Einlauf von DLC-Schichten.....	49
2.2.3 Oxidativer Verschleiß tetrahedral amorphen Kohlenstoffs.....	50
2.2.4 Wachstum von CNTs.....	52
2.2.5 Elektronischer Transport in CNTs.....	53
2.2.6 Leitfähigkeit verspannter CNTs für Sensoranwendungen .....	54
2.2.7 Kontakte zwischen Metallen und CNTs .....	55

2.3	Nanoelektronik.....	56
2.3.1	Gerätesimulation .....	57
2.3.2	Prozesssimulation .....	59
2.3.3	Bauelementesimulation.....	62
2.3.4	Anwendung von Simulatoren.....	63
2.4	Zusammenfassung und Fazit .....	68
	Literatur und Referenzen.....	68
	Autoren.....	70
<b>3</b>	<b>Strukturierungsverfahren.....</b>	<b>72</b>
3.1	Überblick.....	74
3.2	Lithographie .....	74
3.3	Alternative Verfahren zur Nanostrukturierung mit EUV.....	78
3.4	Nanostrukturierung mit Laserstrahlung .....	79
3.5	Nanoimprint .....	86
3.6	Fokussierte Ionenstrahlen .....	90
3.7	Zusammenfassung und Fazit .....	93
	Literatur und Referenzen.....	94
	Autoren.....	96
<b>4</b>	<b>Elektronik .....</b>	<b>98</b>
4.1	Mikroelektronik als Nanotechnologie.....	100
4.2	Kristallzüchtung für die Mikroelektronik.....	101
4.3	Frontend Halbleiterprozesstechnik.....	104
4.4	Halbleiterbauelemente .....	108
4.5	Halbleiteranalytik .....	109
4.6	Systeme.....	112
4.7	Zusammenfassung und Fazit .....	114
	Literatur und Referenzen.....	114
	Autoren.....	115

<b>5</b>	<b>Neuartige Solarzellen.....</b>	<b>116</b>
5.1	Einführung .....	118
5.2	Organische Solarzellen.....	119
5.2.1	Grundlagen .....	119
5.2.2	Vorteile und Herausforderungen der organischen Photovoltaik .....	121
5.2.3	Herstellungsverfahren.....	122
5.2.4	Aufskalierung: von der Zelle zum Modul .....	123
5.2.5	Trends .....	124
5.2.6	Ausblick/Fazit .....	125
5.3.	Farbstoffsolarzellen.....	125
5.3.1	Einführung .....	125
5.3.2	Funktionsweise.....	126
5.3.3	Materialoptimierung führt zu höherer Leistung .....	127
5.3.4	Modulkonzept und Herstellung.....	129
5.3.5	Energierückgewinnungszeit und Recycling .....	131
5.3.6	Anwendungsmöglichkeiten und Märkte.....	132
5.3.7	Fazit .....	133
	Literatur und Referenzen.....	133
	Autoren.....	135
<b>6</b>	<b>Sensoren – Sinnesorgane der Dinge .....</b>	<b>136</b>
6.1	Sensoren – Sinnesorgane der Dinge .....	138
	EMFT-Kompetenzen .....	140
6.2	Sensormaterialien und funktionelle Moleküle.....	140
6.2.1	Anwendungen/Projekte .....	140
	Sensorfarbstoffe zur Frische-Kontrolle von Lebensmitteln.....	141
	Sensortextilien als intelligente Arbeitsschutz-Kleidung.....	143
6.3	3D-Integrationstechnologien NEMS .....	144
6.3.1	Anwendungen/Projekte .....	145
	Nanogap-FET ermöglicht hochempfindliche Sensoren.....	145
	3D-Integration für leistungsstarke heterogene Systeme .....	146

	Energieautarker Herzschrittmacher im Miniaturformat .....	146
6.4	Oberflächenmodifikation und Nanostrukturierung .....	147
6.4.1	Anwendungsbeispiele/Projektbeispiele .....	148
	Programmierte Moleküle in der Laboranalytik .....	148
	Punktlandung dank programmiertem Substrat .....	148
	Nanodefekte identifizieren und beheben .....	149
6.5	Fazit/Ausblick .....	150
	Literatur und Referenzen .....	150
	Autoren .....	151
<b>7</b>	<b>Nanopartikelherstellung mittels Flow chemistry .....</b>	<b>152</b>
7.1	Formulierung polymerbasierter Nanopartikel im Durchfluss .....	154
7.1.1	Polyester-Partikel .....	154
7.1.2	Polymersome .....	156
7.2	Anorganische Nanopartikel .....	159
7.2.1	Beispiele für synthetisierte Nanopartikel .....	161
7.2.2	Nanopartikel-Charakterisierung .....	163
	Literatur und Referenzen .....	164
	Autoren .....	167
<b>8</b>	<b>Plasmapolymerisation – eine Schlüsseltechnologie zur Herstellung funktionaler Nanoschichten .....</b>	<b>168</b>
8.1	Einleitung .....	170
8.2	Prinzip der Plasmapolymerisation .....	171
8.3	Plasmatechnologien und Verfahrenseigenschaften .....	173
8.4	Entwicklungsbeispiele .....	175
	a) Verlängerung der Lebensdauer von Solarmodulen: Schutzschichten .....	175
	b) Stabile und sichere Klebverbindung im Leichtbau: Haftvermittler .....	176
	c) Lackieren ohne Vorbehandlung: Trennschichten .....	176
	d) Wasserabweisende Schichten für Minusgrade: Anti-Eisbeschichtungen .....	177
	e) Katheter ohne Schmerzen – Bioaktive Beschichtungen .....	181

	Literatur und Referenzen.....	182
	Autoren .....	183
<b>9</b>	<b>Nanotechnologie für Beschichtungen aus flüssiger Phase.....</b>	<b>184</b>
9.1	Nanotechnik auf dem Gebiet der Farben und Lacke .....	186
9.2	Einsatz nanoskaliger Partikel (»Pigmente« und »Füllstoffe«) bei Beschichtungen .....	186
9.3	Modifizierung von Polymersystemen mittels beladener Zeolithe .....	188
9.4	Modifizierung von Polymersystemen mittels nanowandiger Polymerkapseln.....	189
9.5	Stabilisierung von Nanopartikeln in Beschichtungen .....	190
9.6	Herstellung von Oberflächen mit funktioneller Nano-Topografie .....	193
	Literatur und Referenzen.....	195
	Autoren.....	197
<b>10</b>	<b>Polymerbasierte Nanokomposite.....</b>	<b>198</b>
10.1	Einleitung .....	200
10.2	Nano-Komposite auf der Basis thermoplastischer Polymere.....	200
10.2.1	Herstellung von thermoplastischen Nano-Kompositen .....	200
	Materialtechnische Einflüsse.....	202
	Verfahrenstechnische Einflüsse.....	203
	Sonderverfahren.....	204
	NanoDirekt-Verfahren.....	204
	Ultraschalleinkopplung.....	205
10.2.2	Verarbeitung von Nano-Kompositen .....	205
10.2.3	Eigenschaften von Nano-Kompositen .....	206
	Elektrische Eigenschaften.....	206
	Mechanische Eigenschaften allgemein .....	208
	Mechanische Eigenschaften von Nano-Schichtsilikat-Kompositen .....	208
	Mechanische Eigenschaften von thermoplastischen CNT-Kompositen .....	209
10.3	Nano-Komposite auf der Basis duromerer Polymere.....	210
	Herstellung.....	210
	Mechanische Eigenschaften .....	210

	Produktivitätssteigerung von Verklebungen durch Nanopartikel .....	211
10.4.	Nanoskalig strukturierte Polymer/Polymer-Komposite .....	212
	Blockcopolymeren .....	212
	Nanoskalig strukturierte biogene Thermoplaste .....	212
10.5	Nanoskalig strukturierte Duromere .....	214
10.6	Anwendungen von Nano-Kompositen .....	215
	Anwendungen mit Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit .....	216
	Anwendung in der Herstellung elektrisch leitfähiger Pfade .....	216
	Nano-Komposite in Sensoranwendungen .....	216
	Anwendungen mit Anforderungen an spezielle Oberflächeneigenschaften am Beispiel eines Badewannenlifters .....	217
	Anwendung von CNT-Nano-Kompositen in Partikelschaumstoffen .....	217
	Anwendung von CNT-Kompositen in mechanisch wechselbelasteten Bauteilen am Beispiel einer Schuhsohle .....	218
	Anwendungen in Duromeren .....	219
	Literatur und Referenzen .....	220
	Autoren .....	222
<b>11</b>	<b>Hybridpolymere .....</b>	<b>224</b>
11.1	Hybridwerkstoffe und in-situ Nanokomposite .....	226
11.1.1	Nanokomposite mit Polymermatrix .....	226
11.1.2	Hybridpolymere .....	227
11.2	Herstellung von Hybridpolymeren .....	228
11.3	Eigenschaftsprofile von Hybridpolymeren .....	231
11.4	Anwendungsbeispiele für Hybridpolymere .....	233
11.4.1	Schichten und Oberflächenveredelung .....	233
11.4.2	Bulkmaterialien und Komposite .....	237
11.5	Spezielle Formgebungsmöglichkeiten von Hybridpolymeren .....	238
11.5.1	UV-Vernetzung für Fasern/Membranen/Verkapselung .....	238
11.5.2	3D-Freiformgebung durch Zweiphotoneninduzierte Polymerisation .....	239
11.6	Aktuelle Arbeiten und Ausblick .....	240

	Literatur und Referenzen.....	240
	Autor .....	241
<b>12</b>	<b>Nanoskaliges Hartmetall – Fiktion oder Realität? .....</b>	<b>242</b>
12.1	Zusammenfassung.....	244
12.2	Einführung .....	244
12.3	Herstellung nanoskaliger Hartmetalle.....	246
12.4	Mechanische Eigenschaften .....	249
12.5	Zerspanungsleistungen .....	250
12.6	Schlussfolgerungen und Aussicht.....	251
	Literatur und Referenzen.....	251
	Autoren.....	253
<b>13</b>	<b>Nanomaterialien in Verpackungen und Barrierefolien.....</b>	<b>254</b>
13.1	Einleitung .....	256
13.2	Nanomaterialien .....	257
13.2.1	Auftrag von Schichten aus der Gasphase .....	257
13.2.2	Auftrag von Schichten aus der flüssigen Phase .....	258
13.2.3	Integration von Nanopartikeln in Folien oder Schichten .....	259
13.3.	Einsatzmöglichkeiten von Nanomaterialien in Verpackungen und Barrierefolien .....	259
13.3.1	Modifizierung mechanischer und thermischer Eigenschaften .....	259
13.3.2	Modifizierung elektrischer und optischer Eigenschaften .....	260
13.3.3	Oberflächenmodifizierung .....	261
13.3.4	Barrierewirkung .....	262
13.3.5	Chemische und biologische Wirkung .....	264
13.4	Sicherheitsaspekte von Nanopartikeln .....	265
13.4.1	Gesundheitsgefährdung .....	265
13.4.2	Rechtliche Situation .....	266
13.4.3	Migration .....	267
13.5	Zusammenfassung.....	268

	Literatur und Referenzen.....	269
	Autoren.....	271
<b>14</b>	<b>Nanobiotechnologische Materialien und Beschichtungen für die Medizintechnik .....</b>	<b>272</b>
14.1	Biomaterialien für biomimetischen Gewebeersatz – körpereigenes Gewebe neu hergestellt .....	274
14.1.1	Digital unterstützte Herstellungsverfahren zum zwei- und dreidimensionalen Aufbau makromolekularer Strukturen – Bioprinting.....	275
14.1.2	Additive Fertigungsverfahren für Gewebeaufbau .....	276
14.2	Biotinten für den Aufbau komplexer makromolekularer Strukturen .....	276
14.2.1	Die Natur als Vorbild – Biotinten mit Molekülen der nativen Gewebematrix.....	278
14.2.2	Herausforderung – Regeneration von Knochengewebe .....	280
14.3	Oberflächenveredelung gedruckter Strukturen für die Gewebefunktionalität.....	281
14.4	Biomimetische Biomaterialien – ein Modell für die Zukunft.....	282
14.5	Nanotechnologische Beschichtungen für die Medizintechnik .....	282
14.6	Nanoskalige Beschichtungen aus intelligenten Polymeren – Kontrolle der Zelladhäsion ...	282
14.7	Schaltbare Polymerbeschichtungen für die Zellkultur .....	283
14.7.1	Thermoresponsive nanoskalige Polymerschichten als biomedizinische Technologieplattform .....	285
	Literaturverzeichnis .....	286
	Autoren.....	287
<b>15</b>	<b>Nanomaterialien für elektrische Energiespeicher .....</b>	<b>288</b>
15.1	Einleitung .....	290
15.2	Elektroden für Nickel-Metallhydrid-Batterien .....	290
15.3	Binderfreie Schwefel-Elektroden für Lithium-Batterien .....	291
	Herstellung.....	292
	Eigenschaften.....	292
15.4	Einsatz nanoskaliger Materialien in Lithium-Batterien .....	294
15.5	Elektroden für Doppelschichtkondensatoren .....	297
15.6	Bipolarplatten für Redox-Flow-Batterien.....	298

Literatur und Referenzen.....	301
Autoren.....	302
<b>16 Sicherheit beim Umgang mit Nanomaterialien .....</b>	<b>304</b>
16.1 Einleitung .....	306
16.2 Mechanismen der Toxizität .....	307
16.2.1 Schwerlösliche Nano- versus Mikro-Partikel.....	307
16.2.2 Lösliche Partikel .....	307
16.2.3 Granuläre oder faserige Nanopartikel.....	307
16.3 Expositionsrouten .....	308
Dermale Absorption .....	308
Ingestion .....	309
Inhalation .....	309
16.4 Toxizitätsprüfung von Nanopartikeln .....	310
16.4.1 Dermale Absorption und Ingestion .....	310
16.4.2 Erzeugung von Aerosolen .....	313
Nanopartikel-Aerosole für biokinetische Experimente .....	313
Nanopartikel-Aerosole bestehend aus Agglomeraten mit Neigung zum Zerfall nach Deposition in der Lunge .....	313
Aerosole erzeugt durch Dispersion von Trockenpulvern (Bulkmaterial) .....	313
16.4.3 OECD-Richtlinien Partikelinhalation .....	314
16.4.4 Sonderfall: Faserige Nanopartikel .....	314
Nanofasern bzw. Kohlenstoffnanoröhren – CNT mit Dicken <100 nm .....	314
16.4.5 Sonderfall: Nanoplättchen .....	315
16.4.6 In vitro-Toxizitätstests .....	316
16.5 Ansätze zur toxischen Bewertung .....	317
16.6 Regulatorische Ansätze.....	318
16.7 Schutzmaßnahmen – Wirksamkeit .....	319
Schutzmaßnahmen bei Inhalationsexperimenten mit Nanopartikeln .....	319
Anforderungen an einen vorläufigen Beurteilungsmaßstab .....	319
Einige Grenzwerte .....	321

Referenzen .....	321
Autor .....	323
<b>17 Fraunhofer NanoNavigator – Lösungsfinder im Universum der Nanotechnologie.....</b>	<b>324</b>
17.1 Potenziale und Herausforderungen Nanotechnologie in der Anwendung .....	326
17.2 Zugang zur Nanotechnologie .....	328
17.3 Systematisch zur richtigen nanotechnischen Lösung .....	330
17.4 Die vier Schritte des Fraunhofer NanoNavigators .....	332
17.4.1 Schritt 1: Identifikation von technologischen Herausforderungen im Unternehmen .....	332
17.4.2 Schritt 2: Recherche nach nanotechnologischen Lösungen .....	335
17.4.3 Schritt 3: Analyse und Nutzenbewertung von identifizierten Lösungen.....	339
17.4.4 Schritt 4: Bestimmung von Handlungsempfehlungen für relevante Lösungen .....	340
17.5 Ausblick.....	342
Literatur und Referenzen.....	343
Autoren .....	344
<b>18 Blick in die Zukunft – Foresight und Politikberatung.....</b>	<b>346</b>
18.1 Weshalb braucht man in der Nanotechnologie gute Politikberatung? .....	348
Kriterium 1: Unabhängigkeit .....	349
Kriterium 2: Wissenschaftlichkeit und Kompetenz .....	349
Kriterium 3: Kommunikation und Interaktion .....	349
Kriterium 4: Vermittlung und Ergebnispräsentation .....	349
Kriterium 5: Reaktionsfähigkeit und Antizipation.....	349
Kriterium 6: Distanz .....	350
18.2 Auf welche künftigen Forschungsthemen muss sich die FuE-Politik einstellen? .....	350
18.3 Welche Rolle kann Nanotechnologie in Horizon 2020 spielen? .....	352
18.4 In welchen Themenfeldern entstehen Potenziale für künftige Kooperationen zwischen Europa und Russland?.....	353
18.5 Welche ökonomischen Potenziale hat die Nanotechnologie? .....	355
Literatur.....	358
Autoren.....	359