

Michael Köhler

Nanotechnologie – Realität und Visionen

Visionen sind oft Voraussetzungen für wichtige Innovationen. Nach der Vision steht am Anfang besonders erfolgreicher technischer Entwicklungen häufig die Lösung einer einzelnen technischen Aufgabe, die sich in der Folgezeit für ein neues technisches Konzept als fundamental erweist. In dieses Muster paßt die Nanotechnologie nicht.

Auch am Anfang der Nanotechnologie standen Visionen – die Idee schier unendlich erscheinender Gestaltungsmöglichkeiten in den kleinsten Dimensionen der Materie, wie sie R. Feynman postulierte [1, 2] oder die Konzeption molekularer Maschinen, wie sie E. Drexler verfolgte [3]. Derlei Visionen waren jedoch weniger auf die Lösung eines einzelnen technischen Problems als vielmehr auf ein völlig neues, aber sehr allgemeines Betätigungsfeld für zukünftige technische Entwicklungen ausgerichtet. Dieser stark generalisierende Ansatz besitzt eine ungeheure Faszination, birgt aber zugleich eine große Gefahr: Für das neue Technologiefeld fehlt eine zentrale Schlüsselinnovation mit integrativem Charakter.

Der generalisierende Ansatz hat zudem noch eine semantische Unschärfe verursacht: Die Abgrenzung der Nanotechnologie gegenüber früher etablierten Forschungs- und Technologiefeldern ist schwierig. Die Definitionen von Nanotechnologie unterscheiden sich zum Teil beträchtlich. Deshalb ist der wissenschaftliche Wert des Nanotechnologie-Begriffs eher gering anzusetzen.

Auf Grund dieser Situation soll hier darauf verzichtet werden, den Nanotechnologie-Begriff zu präzisieren. Stattdessen soll der Versuch unternommen werden, einige Aspekte zum Stand der Technik zu rekapitulieren und auf technische Herausforderungen zu verweisen, die zu Schlüsselinnovationen im Sinne konkreter technischer Lösungen führen könnten.

Nanometer-Abmessungen in technischen Produkten

Nanomaterialien mit hohen Qualitäten, insbesondere mit ausgezeichneter Homogenität in ihren Eigenschaften, finden sich heute vielfach im Zustand der Marktreife. Das betrifft z.B. nanoheterogene anorganische und polymere Werkstoffe, Nanopartikel, dünne und ultradünne Schichten. Sie vereinen Nanoskaligkeit in mindestens einer Dimension und höchste Präzision in den Abmessungen, die in der Regel für spezielle Eigenschaften verantwortlich sind. Nicht nur extrem große Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisse, auch Anisotropie- und Quantensizeeffekte werden genutzt. Auch wenn die Eigenschaften der einzelnen Nanoobjekte, Nanophasen oder Schichtelemente von zentraler Bedeutung sind, spielt die Individualität dieser Objekte für die Anwendung keine Rolle. Ebenso ist die geometrische Zuordnung untereinander oder gegenüber äußeren Koordinatensystemen von untergeordneter Bedeutung oder völlig irrelevant. Der Aufbau von solchen Na-

nomaterialien läßt sich deshalb mit beliebigen anderen Materialien vergleichen, sofern diese in ihrem atomaren oder molekularen Aufbau ähnlich wohldefiniert sind.

Funktionelle Nanostrukturen, für die die geometrische Zuordnung von entscheidender Bedeutung ist, kommen in den integrierten Festkörperschaltkreisen zum Einsatz. Setzt man die seinerzeit von R. Feynman diskutierte Grenze von 100 nm als Kriterium an, so ist die Massenfertigung von Nanostrukturen in der Computerchipherstellung mit Hilfe lithografischer Methoden seit mehreren Jahren fest etabliert. Für die technische Funktion spielen die genauen Abmessungen der einzelnen Strukturelemente, aber auch die hohe Präzision der Positionierung eine wesentliche Rolle. Lithografische Nanotechnologie ist deshalb ein fester und wirtschaftlich hochbedeutsamer Faktor in der modernen Industrie. Mit der weiteren Abwärtsskalierung hat der sogenannte „top-down-approach“ der Nanotechnologie eine klare technologische wie auch konstruktive Orientierung.

Den elektronischen Mikro- und Nanostrukturen stehen technische Strukturen gegenüber, in denen die Präzision der Mikro- und Nanolithografie nicht primär für die Zuordnung von Strukturen zu einem äußeren Koordinatensystem genutzt wird, sondern bei deren Herstellung nur die Form und Größe der Strukturelemente, eventuell noch deren Orientierung im Raum wesentlich sind. Das Ergebnis sind so genannte Metamaterialien – heterogene Materialien, die auf Grund der enthaltenen Mikro- oder Nanoobjekte ungewöhnliche, makroskopisch meßbare Eigenschaften aufweisen. Position und Individualität der Mikro- oder Nanoobjekte spielen keine Rolle.

Das biologische Vorbild

Die lebende Natur baut auf der Funktion von Nanosystemen auf. Lebewesen haben zahllose nanoskalige Systeme mit unterschiedlichsten Eigenschaften und Funktionen hervorgebracht. Das faszinierendste daran ist jedoch nicht die Fülle unterschiedlicher Systeme und Prinzipien – das Besondere ist die Fähigkeit der Lebewesen, diese Strukturen ohne Beteiligung äußerer Maschinerien entstehen zu lassen.

Das vorbildhafte Funktionsprinzip der Natur ist die Selbstorganisation. Der so genannte „bottom-up-approach“ der Nanotechnologie baut auf diesem Prinzip auf. Durch molekulare Selbstorganisation sollen komplexere Funktionsstrukturen und schließlich komplette Nanosysteme entstehen. Tatsächlich gibt es in den letzten zwanzig Jahren eine Fülle grundlegender Arbeiten, die diesem Ansatz folgen. Um das Begriffsverständnis der Selbstorganisation von dem einer einfachen chemischen Reaktion zu unterscheiden, bezieht man ersteres häufig auf nichtlineare Effekte in gleichgewichtsfernen Systemen. Der Begriff darf jedoch nicht auf die Bildung dissipativer Strukturen verkürzt werden. Tatsächlich beruht die Gestaltungsfähigkeit der Natur auf einer Hierarchie von Selbstorganisationsprinzipien, angefangen von einfachen chemischen Reaktionen zwischen kleinen Molekülen, die sehr wohl auch gleichgewichtsnah ablaufen können, über einfache, getriebene Systeme bis hin zur komplexen Dynamik ganzer Zellen. Der Schlüssel liegt in der weitgehenden Individualität und der Autonomie der sich assemblierenden Komponenten. Die lebende Natur bringt ihre vielgestaltigen Nanosysteme hervor, weil lokal Bedingungen geschaffen werden, die die Bildung der Nanosysteme aus eigenem Antrieb heraus ermöglichen.

Technische Herausforderungen

Es gibt zahlreiche Versuche, den top-down- und den bottom-up-Ansatz miteinander zu verbinden. Wegen des fortgeschrittenen Standes der Nanolithografie liegen die Schwierigkeiten weniger in

der Paßfähigkeit der Längendimensionen – denn einerseits stehen Moleküle und Partikel in einem breiten Größenspektrum zur Verfügung, andererseits können mit strahlolithografischen und Raster-sondentechniken Strukturen bis in den unteren Nanometerbereich herab hergestellt und sogar einzelne Moleküle und Atome manipuliert werden. Das Problem besteht vielmehr im Widerspruch der technologischen Konzepte: Während der top-down-Ansatz den Konventionen der Planartechnik folgt, Zweidimensionalität, anorganische Festkörpertechnologien, hohe Teilchenenergien und extreme Reaktionsbedingungen vorherrschen, sind die Methoden des bottom-up-Ansatzes zu meist nicht auf die Zweidimensionalität beschränkt, sondern nutzen die Formbildung im Raum und bauen auf den subtil kontrollierten Eigenschaften komplexer molekularer Systeme und einem weit gespannten, aber fein abgestuften Spektrum von Reaktivitäten, Reaktionsmechanismen, Selektivitäten, Phasenverhalten und unterschiedlichen Abständen zum thermodynamischen Gleichgewicht auf. Von den vielen Ansätzen zur Vereinigung beider Konzepte ließen sich bisher nur wenige technisch umsetzen, darunter als herausragendes Beispiel die lithografische Herstellung hochintegrierter DNA-Chips [4].

Bei einer Integration beider Konzepte besteht die Gefahr, die Vorteile beider Seiten zu opfern. Mit dem Übergang vom anorganischen Festkörper zu einer Vielfalt mehr oder weniger beweglicher molekularer und supermolekularer Systeme, von den Festkörpertechnologien zur schonenden Flüssigphasensynthese, geht auf der einen Seite häufig die hohe Reproduzierbarkeit und die extrem niedrige Ausfallrate von Strukturen verloren und hohe Integrationsgrade werden unmöglich. Mit dem Übergang von den supermolekularen und gelartigen Systemen zu anorganischen Festkörpern, von hochselektiv reagierenden Molekülen zu Vakuum- und Strahlverfahren, werden die feine Abstufung von Reaktivitäten, die Spezifik von Prozessen, Individualität und Selbstorganisationsfähigkeit aufgegeben. Ein fundamental neues Technologiekonzept, das diese Verluste vermeidet, aber die Vorteile beider Ansätze vereinigt, ist dringend erforderlich.

Aus welcher Richtung könnten derartige Neuerungen kommen? Es liegt in der Natur der Sache, daß sich solche zukünftigen Schlüsselinnovationen kaum prognostizieren lassen. Im folgenden sollen zwei spekulative Ansätze diskutiert werden, die vielleicht helfen können, eine mögliche Denkweise zu illustrieren.

„Molecular Mounting“ – von der Planartechnik zur molekularen Nanotechnologie

„Molecular mounting“ soll die Fähigkeit der Festkörpertechnologie zu extrem wohldeterminierten Abläufen und die Zuordnung zu einem äußeren Koordinatensystem auf supermolekulare und Molekül-Festkörper-Strukturen anwenden.

Die Grundidee besteht darin, das Prinzip der ionenoptischen Positionierung auf komplexe Ionen, größere geladene Moleküle und Nanopartikel zu übertragen und für den Aufbau von hochkomplexen, wahlfrei gestalteten dreidimensionalen Architekturen zu nutzen [5]. Da die Bewegung geladener Teilchen durch den Gasraum mittels elektrischer und magnetischer Felder bequem gesteuert und effizient gestaltet werden kann, werden ein schneller Transport und eine präzise Positionierung möglich. Verfahren wie MALDI-TOF [6] zeigen, daß die Übertragung großer Teilchen ins Vakuum und deren Transport im Gasraum grundsätzlich möglich sind.

Um ein solches Verfahren zu etablieren, müssen Geräte mit sehr variablen Quellen für die unterschiedlichen zu prozessierenden Module – Halbleiter-, Oxid- und Metallnanopartikel, Nanotubes und Cluster, kleinere organische und Koordinationsverbindungen, Oligomere, Polymere und Dendrimere, ggf. auch Tenside, Oligo- und Polypeptide, Proteine, Fette, Kohlenhydrate, Oligo- und

Polynukleotide – integriert sein. Die Übertragung dieser Komponenten, ihre Ionisierung und der Transport im Gasraum müssen ohne Schädigung erfolgen. Werden sie schließlich positions- und orientierungsgenau zur Wechselwirkung oder in Kontakt mit Oberflächen gebracht, so müssen die Translationskomponenten, die internen Schwingungs- und Rotationsanregungen phasengerecht, räumlich und energetisch auf die erforderlichen Kopplungsbedingungen und ggf. Folgeprozesse abgestimmt sein.

Die Materialbereitstellung, die energetische und räumliche Kontrolle der Teilchen und die Einstellung der Kopplungsbedingungen stellen an eine solche Technologie extrem hohe Anforderungen. Wären die Probleme gelöst, könnten jedoch dreidimensionale, extrem hochkomplexe Architekturen entstehen, in denen sich eine Vielzahl von nanotechnisch interessanten Funktionen implementieren ließe. Diese könnten von der Datenspeicherung mit einer Speicherdichte in der Größenordnung von 10^{17}cm^{-3} über zellorganellanaloge Nanofabriken zur Energiekonversion bis hin zu Prozessoren im Mikroliterformat reichen, die Arbeitsgeschwindigkeiten moderner Halbleiterprozessoren mit dem Parallelisierungsgrad menschlicher Gehirne kombinieren.

Autonome Nanosysteme – Von der Synthesemaschine zu synthetischem Leben

Spricht man heute von molekularen Maschinen, wird zumeist an Supermoleküle mit speziellen bewegten Teilen, z.B. die Rotaxane gedacht [6]. Solche „Maschinen“ können sich durch thermische Anregung spontan bewegen und – je nach Strukturmerkmalen – durch thermochemische Reaktionen, Änderung von pH-Wert, Metallionen- oder Ligandenkonzentrationen, elektrochemisch oder photochemisch geschaltet werden. Der gegenwärtige Stand der Entwicklung von Nanomaschinen ist – so bemerkenswert sich dieser auch aus Sicht der Synthesechemie darstellt – gemessen am Vorbild der Natur und den denkbaren technischen Funktionen außerordentlich bescheiden.

Selbstorganisierte dreidimensionale Funktionsstrukturen sind bisher nur in Stoffklassen verfügbar, die uns die Natur voraus entwickelt hat, wie den Proteinen und Nukleinsäuren. Selbst für deren Prozessierung – etwa die identische Replikation von Nukleinsäuresequenzen – werden Werkzeuge benötigt, die wir der Natur entnehmen müssen, so die Polymerasen. Eine Übersetzung molekularer Information aus einer Molekülklasse in eine andere – wie es lebende Zellen ständig im Rahmen der Translation der Nukleinsäuren in Nukleinsäure bei der Realisierung des genetischen Codes praktizieren – gelingt nur mit Hilfe von Extrakten aus lebenden Zellen, die den essentiellen Übersetzungsapparat enthalten. Die makromolekulare Chemie hat uns zwar eine Vielzahl an Polymeren, auch Copolymere, Blockcopolymere und flüssigkristalline Polymere mit hochinteressanten Geometrien in Festkörpern und Gelen beschert – zur gezielten Synthese von Sequenzmolekülen mit spontaner Faltung in dreidimensionale Raumstrukturen, in denen solche Moleküle zu molekularen Maschinen mit speziellen Funktionen werden, ist es außerhalb der natürlichen Klasse der Proteine bisher nicht gekommen. Defizite einer makromolekularen Chemie, die zur Technologie autonomer Nanomaschinen führen soll, betreffen zunächst eine Reihe elementarer Operationen:

- Herstellung von Sequenzmolekülen großer Kettenlänge bei wahlfreier Bausteinanordnung in einem breiten Spektrum von Stoffklassen,
- Übertragung digital-elektronischer Datensätze in molekulare Sequenzen unterschiedlicher Stoffklassen,
- Auslesung von Sequenzinformationen aus einzelnen Molekülen in den synthetisierten Makromolekülklassen,

- Übertragung von Sequenzinformationen von einer Molekülklasse in eine andere,
- identische Replikation von Sequenzmolekülen,
- variierende Replikation von Sequenzmolekülen mit vorgegebener Variationscharakteristik.

Ziel müßte sein, die genannten Operationen nicht mit konventionellen Maschinen durchzuführen, sondern über Nanomaschinen – praktisch makromolekulare Werkzeuge – verfügen zu können, die diese Aufgaben erledigen. Es bleibt zu vermuten, daß diese Aufgabe nicht vom Chemiker allein zu erfüllen ist. Auch wenn die Synthesemethoden, die Eigenschaften der molekularen Module und die Reaktionsbedingungen chemisches know-how betreffen, ist das Grundprinzip des Ansatzes ein ingenieurwissenschaftliches, d.h. ein dem Maschinenbau nahestehendes Problem. Wirkliche Fortschritte sind zu erwarten, wenn es zu einer neuen Technikwissenschaft kommt, die vielleicht als „Molekularer Maschinenbau“ zu bezeichnen wäre. Diese müßte wesentliche methodische Fähigkeiten des Maschinenbaus, der Synthesechemie sowie der Zell- und Molekularbiologie vereinigen, sich aber aus diesen Wissenschaften lösen und ein eigenständiges Methodenfeld aufbauen.

Mit einem solchen radikal neuen Ansatz könnte es dann vielleicht auch gelingen, autonome Maschinen zu entwickeln, die nicht nur ihre eigene Synthese und die Synthese verwandter Verbindungen bewerkstelligen. Vielmehr sind dann auch beliebige nanoskalige Maschinerien denkbar, die durch geeignete Baustein- und Energieflüsse gespeist, durch kooperative Wechselwirkung und funktionelle Mikro- und Makrostrukturen geleitet und durch Nebenprodukt- und Entropiedrainagen entsorgt werden. Bewegung und mechanische Arbeit sind dabei nur ein Aspekt der Tätigkeit dieser Maschinen. Nanomechanik ist eng gekoppelt mit der Prozessierung von Stoffen, Synthese und Raumgliederung. Diese machen das eigentliche Wesen dieser Nanomaschinen aus.

Die räumliche Integration kooperativer Funktionen und die Entwicklung der Fähigkeit zur Selbstreproduktion eines solchen integralen Nanosystems wäre der entscheidende Schritt zu künstlichem Leben. Die Vermehrung und Variation selbstreproduzierender Systeme wäre zwar auf äußere Medien- und Energieversorgung angewiesen, würde aber das Informationsmanagement intern bewältigen. Die stoffliche Basis könnte sich dabei stark von natürlichen Lebewesen unterscheiden. Mit der Entwicklung eines solchen Prinzips unter Verwendung geeigneter Stoffsysteme wären künstliche Lebensformen zum Beispiel für andere Temperaturbereiche und ganz andere Zeitskalen der Lebensprozesse als die der natürlichen auf der Erde vorkommenden Lebewesen vorstellbar.

Gefahren und zu erwartendes Risikopotential

Die aktuellen Risiken der Nanotechnologie ergeben sich vor allem aus möglichen, unbekanntem toxischen Wirkungen von Nanomaterialien und dem ungenügenden Wissen über Transportwege und Anreicherung von Nanopartikeln in Organismen und der Umwelt. Dieses Problem unterscheidet sich nicht grundsätzlich von anderen toxikologischen Risiken und findet in den Risiken der natürlich und konventionell-industriell gebildeten Nanopartikel – z.B. dem Feinstaub – seine schon lange wirkende Entsprechung.

Viel wesentlicher sind die zumeist unabsehbaren psychologischen, sozialen, wirtschaftlichen, politischen und die sich daraus ergebenden Umwelt- und Gesundheitsprobleme durch die Anwendung nanotechnischer Bauelemente und Systeme. Bereits die vergangenen drei Jahrzehnte sind von einer zuvor völlig ungeahnten Umwälzung der Kommunikationstechnologien gekennzeichnet gewesen. Die Fähigkeit zur extrem raschen Datenverarbeitung und der schnelle omnidirektionale

Datenaustausch haben zur Entwicklung einer komplexen, weltweiten Kommunikationsstruktur geführt, die alte Kommunikationsstrukturen überholt, verändert, entwertet und verdrängt. Da die sozialen Strukturen aller menschlicher Gesellschaften maßgeblich über Traditionsmechanismen – vor allem auch über die langfristigen, über mehrere Generationen wirkenden – vermittelt werden, bedeuten die neuen, durch Mikro- und Nanotechnik geschaffenen Mechanismen einen radikalen Umbruch mit extrem tiefgreifenden Folgen. Schon heute sind weltweite Kommunikationsnetze im Entstehen begriffen, die komplizierte ethische Fragen bezüglich Nutzung, Vorherrschaft, Gleichberechtigung und Wettbewerb im Informationsaustausch aufwerfen. Mit der Entwicklung der automatisierten Verarbeitung komplexer Sachverhalte entstehen intelligenzartige Informationsmanagement-Cluster, die den einzelnen Menschen aus seiner zentralen Position im Informationsaustausch an die Peripherie der Kommunikationsstrukturen drängen können. Das bei vielen Menschen zu beobachtende, zunehmende Verlangen, über Internet und Mobiltelefon ständig an Kommunikationscluster angeschlossen zu sein, mag einen ersten matten Vorgeschmack auf die künftig mögliche Abhängigkeiten geben. Durch nanotechnische Miniaturisierung und die damit verbundene Erhöhung der Prozeßgeschwindigkeiten, der manipulierten und gespeicherten Datenmengen, der Parallisierungs- und Vernetzungsgrade wird sich diese Tendenz weiter zuspitzen – unabhängig davon, ob vom einzelnen Mensch als Problem wahrgenommen oder nicht.

Ein entscheidend neue Problematik wird mit der Beseitigung der Diskrepanz zwischen Informationsverarbeitungs- und -transduktionsdichte zu erwarten sein. Zur Zeit leben wir in einer technischen Welt, in der digitale elektronische Daten bereits in großer Geschwindigkeit und Menge prozessiert werden können. Für die Informationsübertragung in stoffliche Systeme – in diesen eingeschlossen auch der Mensch mit seiner Intelligenz – stehen den schnellen Verarbeitungssystemen nur sehr leistungsschwache Schnittstellen gegenüber. Stoffliche Information, wie sie durch chemische Sensoren oder Aktoren übertragen wird, muß an den Schnittstellen des Datenaustauschs durch ein enges Nadelöhr, das um viele Zehnerpotenzen langsamer arbeitet und außerdem um Zehnerpotenzen weniger parallelisiert ist als die elektronischen Systeme. Ähnlich verhält es sich mit den Schnittstellen zwischen Organismen, Menschen und Maschinen. Die Parallelisierungsgrade von Joystick, Bildschirmen und Tastaturen – den gegenwärtig wichtigsten Mensch-Maschine-Schnittstellen – liegen weit unterhalb der in elektronischen Systemen erreichbaren Interfacedichten, die Übertragungsrate liegt mit maximal etwa 10 Hz um mehr als acht Zehnerpotenzen unterhalb der elektronisch möglichen Übertragungsraten. Nanotechnologie könnte dazu führen, daß diese Diskrepanzen durch völlig neue Schnittstellentypen beseitigt werden. In der Stoffkopplung könnten dabei Mikro- und Nanoreaktoren, Nanoelektroden und strukturiertes Licht eine wesentliche Rolle spielen. Die Begleiterscheinung der Entwicklung und Einführung solcher Bauelemente und Systeme ist vermutlich ein unvorstellbar drastischer Eingriff in die intimsten Sphären und hätte drastische Auswirkungen auf alle Aspekte menschlicher Persönlichkeit sowie sozialer Beziehungen. Im Umgang mit einem solchen technischen Potential stellt sich mehr als die technische eine extreme ethische Herausforderung.

Schließlich soll hier noch kurz das Risikopotential autonomer Nanomaschinen diskutiert werden. Über die Berechtigung heute nur irrational formulierter Ängste vor der Unterwerfung des Menschen durch Völker von autonomen Nanomaschinen kann bestenfalls spekuliert werden. Es hängt maßgeblich von der Konstruktion und den Eigenschaften der Nanomaschinen ab, ob sie zu einer Gefahr für den Menschen werden können. Zweifellos wird man, wenn es denn einmal selbstreplizierende autonome Nanosysteme geben sollte, ähnlich wie bei biologischen Mikroorganismen, Viren und Computerviren sowohl für eine strenge Hygiene als auch für klare Richtlinien im Umgang mit diesen Objekten sorgen müssen. Es ist heute schwer zu prognostizieren, ob die Gefahren

grundsätzlich größer sind als die von der modernen Biotechnologie ausgehenden. Gentechnisch veränderte Mikroorganismen können schon heute zum Wohl der Menschen eingesetzt oder zu einer extrem gefährlichen und heimtückischen Waffe werden. Ähnlich – nur mit einem weitaus breiteren Spektrum an Handlungsmöglichkeiten, damit auch Fehlverhalten und Gefahrenpotential – wird sich die Entwicklung und die Kontrolle von selbstreplizierenden autonomen Nanomaschinen gestalten.

Literatur

- [1] R.P. Feynman: There is a plenty of room at the bottom, Eng. and Sci. 23 (1960), 22-36
- [2] R.P. Feynman: Quantum mechanical computers, Optics News 11 (1985), 11-20
- [3] K.E. Drexler: Nanosystems (John Wiley and Sons 1992)
- [4] S.P.A. Fodor, R. Rava, X.C. Huang, A.C. pease, C.P. Holmes, C.L. Adams. Nature 364 (1993), 555
- [5] M. Köhler. Nanotechnologie (Wiley-VCH 2003), 144f
- [6] V. Balzani, A. Credi, M. Venturi. Molecular devices and machines (Wiley-VCH 2003)

[01.02.08]

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Michael Köhler
Technische Universität Ilmenau
Institut für Mikro- und Nanotechnologien / Institut für Physik
PF 10 05 65
D – 98684 Ilmenau
michael.koehler@tu-ilmenau.de