

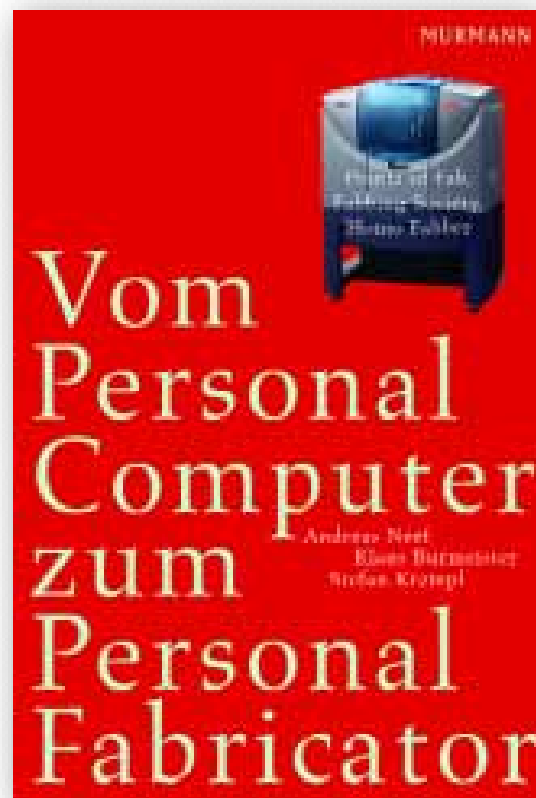
Fabbing Society

→ Diese Technologie verändert unser Leben

Die industrielle Fertigung steht vor einer tiefgreifenden Veränderung: Nahezu unbemerkt von der Öffentlichkeit haben Wissenschaftler Produktionsverfahren entwickelt, die Computermodelle in dreidimensionale Gegenstände verwandeln.

In *Vom Personal Computer zum Personal Fabricator* schildern Andreas Neef, Klaus Burmeister und Stefan Krempf, wie sich diese leise Revolution auf Produktionsprozesse, Unternehmensalltag und Privatleben auswirken wird. Die Autoren befassen sich mit verschiedenen Produktionsverfahren, stellen Marktführer und Visionäre vor und benennen künftige Anwendungsbereiche – von der Mode bis zur Unterhaltungsindustrie.

- * **Andreas Neef** ist Unternehmensberater und geschäftsführender Gesellschafter des Think Tanks Z_punkt The Foresight Company, der Unternehmen bei der Entwicklung langfristiger Strategien berät.
- * **Klaus Burmeister** ist Unternehmensberater, Gründer und Geschäftsführer von Z_punkt The Foresight Company.
- * **Stefan Krempf** ist freier Journalist und Autor verschiedener Bücher zu Themen rund um das Internet und Informationstechnik.



Andreas Neef, Klaus Burmeister & Stefan Krempf
Vom Personal Computer zum Personal Fabricator
Points of Fab, Fabbing Society, Homo Fabber
ca. 120 Seiten, € (D) 35.- / sFr. 59,90 / € (A) 36.-
ISBN 3-938017-39-3, gebunden,
mit diversen Abbildungen
Warengruppe 785 / DDC 650
Erscheint im August 2005



Inhalt

Vorwort 9

The Big Picture 11

Rapider Zuwachs in der Rapid-Familie 14

Die wahre Universal-Maschine 16

Santa-Claus-Maschinen 22

Stand der Technik und Anwendungsgebiete 25

Die wichtigsten RP-Verfahren 28

Stereolithographie (SLA): Der Klassiker 28

Selektives Laser-Sintern (SLS): Das Allround-Talent 31

Fused Deposition Modeling (FDM): Das Sahnehäubchen 35

Inkjet-Printing: Wegbereiter für den Massenmarkt? 37

Dreidimensionales Printing (3DP): Rapid Production 39

Drei weitere Schlüsselverfahren im Kurzüberblick 41

Laminated Object Manufacturing (LOM) 41

Laser Engineered Net Shaping (LENS) 42

Contour Crafting: »Fertighäuser« vom Betondruck-Roboter 44

Der RP-Markt 47

Systemhersteller 47

Europäische Hersteller 49

Die amerikanischen Marktführer 56

Die weltweite Konkurrenz 58

Der Material- und Servicemarkt 60

Potenziale der Technik – notwendige Schritte 61

Von Designer-Klamotten zu Heroes on demand 63

Alle Buzzwords sind schon da: Mikro, Nano, Bio 67

Knochen, Haut und Organe aus dem Drucker 70

Nano-Assembler 71

Robotik und Rapid Prototyping	73
RP für die Homeland Security	74
Barrieren für weiteres Wachstum	75
Schwächen der RP-Systeme	75
Geschwindigkeit	75
Qualität der Fabrikate	76
Objektgröße	76
Kosten	77
Materialschwächen	77
Rechtliche Probleme	78
Unternehmensinterne Hürden und allgemeine Skepsis	79
Szenarien der Marktentwicklung	81
Das Industrie-Szenario	81
Das Kinko-Szenario	82
Das Heim-Szenario	83
Das Umfeld: Leittrends in Wirtschaft und Gesellschaft	85
Mass Customization ...	86
... in Minifabriken	89
Auswirkungen auf Produkte und Preisentwicklung	91
Der Global Player der Zukunft – Netzwerke aus »Local Players«	92
Auf dem Weg zur Fabbing Society	95
Die Überall-Gesellschaft dank Points of Fab	95
Von der Mass Customization zur Self Customization	96
Der unternehmerische Konsument	97
Die Kreativgesellschaft: Von der Ich-AG zur Ich-Fabrik	98
Super-Individualisierung	98
Nachbarschafts-Szenario: Modulare Mini-Fabriken und Momo-LUFs	100

»Napster Fabbing«: Kostenlose Warenlieferung per Download	100
Die P2P-Fabbing-Society als positive Utopie	102
Mögliche Akteure in der Fabbing Society	104

Ausblick: A Whole New Game 105

Die Fabbing Society kommt – so oder so	106
Die Informatisierung der materiellen Produktion	107

Literatur 109

Anhang 111

Auf dem Weg zum »Hightech-Self-Providing«	111
Interview mit Willy Bierter, Innovationsforscher und Berater, über die Rückkehr des selbstproduzierenden Konsumenten	
Den Weg vom Design zum Produkt verkürzen	114
Interview mit Hendrik John, Geschäftsführer der Marler Envisiontec GmbH	
Von Individualisierungsutopien zu echtem Mehrwert	118
Interview mit Frank Piller, Forscher am Lehrstuhl für Allgemeine und Industrielle Betriebswirtschaftslehre an der TU München	
Individuelle Produkte zum Preis von Seriengütern	123
Interview mit Dr. M. Stotko, Leiter Global Marketing der Kraillinger EOS GmbH	

Anmerkungen 128

Bildnachweis 133

Vorwort

Als Ende der siebziger Jahre die ersten Personal Computer auf den Markt kamen, ahnte wohl kaum jemand, welche enorme Dynamik von dieser Innovation ausgehen würde. In nur 25 Jahren hat die Durchdringung des Alltags mit dezentraler, persönlicher Computertechnologie die Funktionsweise der Wirtschaft und das Gefüge der Gesellschaft massiv verändert. Relativ unbemerkt von der öffentlichen Wahrnehmung bahnt sich nun eine weitere stille Revolution an: die Dezentralisierung des Produzierens.

Ebenso wie einst die raumfüllenden Mainframes durch dezentrale, vernetzte Kleinrechner ersetzt wurden, wird die Herstellung eines erheblichen Anteils von Alltagsprodukten zukünftig in dezentralen Produktionsstrukturen erfolgen. Anstatt billige Massenartikel in Offshore-Fabriken zu produzieren, werden kundenspezifische Klein- und Kleinstserien in flexiblen und miteinander vernetzten Mini-Fabriken vor Ort hergestellt. Ein zentraler Treiber dieser Entwicklung sind neue Technologien zur direkten Fertigung von Objekten aus Computermodellen, wie Fabling-Technologien, »3D-Drucker«, die derzeit noch vorwiegend im industriellen Modellbau, dem Rapid Prototyping, eingesetzt werden. Mit der technischen Weiterentwicklung der Systeme und sinkenden Gerätepreisen werden Fabling-Technologien zunehmend auch für Alltagsanwendungen interessant. Preiswerte 3D-Drucker (Personal Fabricator) könnten schon in der nächsten Dekade in Büros und Privathaushalten Einzug halten.

Der Paradigmenwechsel hin zur Dezentralität ist hingegen nicht nur technologisch motiviert. Sowohl der Wandel der Konsumwelt, der auf Produzentenseite zu immer kleineren Losgrößen führt, als auch die Anfälligkeit und die ökologischen Kosten der globalisierten Produktions- und Logistikstrukturen machen das Konzept einer Rückführung der Produktion an den Ort des Verbrauchs hoch attraktiv. Eine dezentralisierte Produktionslandschaft wird zwangsläufig zu einem neuen Wirtschaftsspiel führen, einem

»Whole New Game«, in dem die Rollen zwischen Entwickler, Produzent, Händler und Konsument neu verteilt werden. Produktion und Konsum rücken enger zusammen und der Kunde wird zum aktiven Teil der Wertschöpfungskette. Die industriellen Geschäftsmodelle werden in der »Fabbing Society« der Zukunft auf den Kopf gestellt.

Das vorliegende Buch ist gleichzeitig Bestandsaufnahme und Zukunftsstudie. Es spiegelt damit inhaltlich und methodisch den Research-Ansatz von Z_punkt The Foresight Company wieder. Um die Potenziale von neuen Technologien strategisch bewerten zu können, ist es notwendig, die Wirkung von langfristigen Umfeldtrends zu berücksichtigen und die Transformation der Anwendungs- und Marktkontexte vorauszudenken. Z_punkt betreibt diese Kontextanalysen systematisch für Unternehmen aus Technologie, Dienstleistung und Handel.

In den folgenden Kapiteln vermitteln wir zunächst fundierte Informationen zum State of the Art der Fabbing-Technologien und deren Anwendungen. Danach führen wir hinaus in die Zukunftswelt der dezentralisierten Produktion, tasten Entwicklungsfelder und -barrieren ab und skizzieren die Konturen der Fabbing-Märkte von morgen. Vieles in diesem Buch klingt noch wie Zukunftsmusik. Doch manchmal kommt die Zukunft schneller als erwartet.

Wir danken allen Kollegen von Z_punkt, die zum Entstehen dieses Buches beigetragen haben, allen voran Willi Schroll für seine fundierte Basisarbeit und seine inspirierenden Einsichten und Ideen zur Zukunft der Fabbing Society.

Andreas Neef / Klaus Burmeister / Stefan Krempel
April 2005

The Big Picture

Sie haben eine Geschirrspülmaschine und empfinden dies als große Erleichterung? Aber noch bleibt Ihnen das leidige Ein- und Ausräumen des Geschirrs, das, sauber gespült, in einer Reihe großer Schränke aufbewahrt und nach dem nächsten Essen derselben Prozedur unterzogen wird. Das muss nicht sein, dachten sich Erfinder am legendären Media Lab des Massachusetts Institute of Technology (MIT). Sie haben ein Hightech-Gerät in Größe einer Spülmaschine erfunden, das Tassen, Teller und Schüsseln aus Plastik für jede Mahlzeit im Handumdrehen frisch produziert.¹ Eine typische Ausgeburt der amerikanischen Wegwerfgesellschaft, denken Sie? Nicht ganz, denn der »Geschirrmacher« schmilzt die Essensutensilien auch gleich wieder ein und hebt die Rohstoffe für die nächste Fertigungsrunde auf. Produktion und Recycling sind in einer Maschine vereint, die eine Mischung aus einem Drucker für die Geschirrherstellung und einem Brennofen für die Rückführung des Plastiks in seine Ausgangsform darstellt. So wie es im Haushalt der Zukunft im Wohnzimmer Video on Demand und in allen Räumlichkeiten Music on Demand gibt, macht die Computer-Revolution gemäß den MIT-Forschern auch vor der Küche nicht Halt: »Dishes on Demand« – Geschirr auf Abruf – haben sie ihr Verfahren betitelt.

Den Geschirrmacher können Sie heute noch nicht im Laden kaufen. Aber der – zugegebenermaßen noch etwas unförmige – Prototyp im Media Lab kann bereits alle neunzig Sekunden einen Teller oder einen anderen Tischgebrauchsgegenstand ausspucken. Was herauskommen soll, kann die Hausfrau bzw. der Hausmann auf einem Zahlenmenü ähnlich wie bei einer Mikrowelle einstellen. »Smarte« Acrylkunststoffe, die sich ihre Ausgangsform »merken« und bei leichter Erhitzung diese wieder annehmen, erlauben ein Recycling ohne hohe Energiezufuhr. Küchenschränke braucht es daher nur noch für Gläser oder fürs Besteck. Aber die Pioniere der neuen heimischen »Fabrik-

Kultur« arbeiten bereits daran, dass auch derlei Geraffel nur noch on Demand hergestellt wird. Ihr eigentliches Ziel ist es, einen »persönlichen Fabrikator« zu fertigen. Der soll die Zahl der permanent vorgehaltenen Haushaltsgegenstände, mit denen wir uns heute noch umgeben und den Wohnraum zukleistern, auf ein Minimum reduzieren. An die Stelle der Platz raubenden Gebilde aus Atomen soll der digitale, computergesteuerte und weitgehend virtuelle Designtransfer treten. Die Objekte befinden sich nach Vorstellung der MIT-Vordenker die meiste Zeit im Rechner, werden nur dann »ausgedruckt«, also in eine feste Form überführt, wenn sie wirklich gebraucht werden. Danach »verschwinden« sie genauso schnell wieder und es bleiben nur noch die Rohstoffe übrig.

Das Vorhaben der Küchenoptimierer am Media Lab ist Teil einer langsam einsetzenden massiven Transformation der Produktion aus dem Geiste der informationstechnischen Revolution. 3D-Drucker können heute bereits nicht nur Plastikteller anfertigen, sondern beispielsweise auch künstliche Zähne, Knochen, Hautgewebe, Sushi oder Metallteile. »Wir spielen Gott, wir schaffen etwas aus nichts«, gibt Boris Chichkov, Physikprofessor am Laserzentrum Hannover, als leicht vermessen klingende Forschungsparole aus. Ganz richtig ist das nicht, denn bei dem »Nichts« handelt es sich in seinem Fall um ein Kunstharz. Groß ist das transparente Kügelchen tatsächlich nicht, aus dem die Hannoveraner Physiker im Modell eine Miniatur der Venus von Milo mithilfe von ultrakurzen Laserpulsen kreieren. Doch die eigentlichen Anwendungsfelder sehen sie bei Mikroimplantaten fürs Innenohr oder bei Röhrchen für die Venenstabilisierung sowie bei Lichtstrahlenleitern für die Photonik, ein Fachgebiet der Technischen Physik, das sich mit allen Formen der Nutzung von Licht und seinem gezielten Einsatz als Träger von Information sowie zur Inspektion und Modifikation von Materie beschäftigt.²

Die Chichkov-Truppe, die eng mit verschiedenen Fraunhofer-Instituten zusammenarbeitet, ist nur ein Beispiel für eine wachsende Gemeinde von Halbgöttern. Weitgehend unbemerkt von der allgemeinen Öffentlichkeit haben sich in die industrielle Produktion in den vergangenen gut 20 Jahren computergesteuerte Fertigungsverfahren eingeschlichen, die virtuelle Modelle aus

dem Rechner in reale Gegenstände ummünzen. Die auf den ersten Blick wundersam erscheinende Verwandlung von Bits in Atome ist allerdings keine moderne Alchemie. Es geht alles mit rechten Dingen – sprich: mit den Naturgesetzen – zu.

Dennoch werden die traditionellen Verfahren zum Bau von Körpern völlig auf den Kopf gestellt: Hatte Michelangelo seinen David noch aus einem großen Marmorblock herausgehauen und schälten später Fräs-, Dreh- oder Bohrmaschinen aus den unterschiedlichsten natürlichen und künstlichen Werkstoffen die gewünschten Fertigungsteile heraus, arbeiten die neuen Produktionsmethoden generativ bzw. additiv. Sie bauen also aus Kunststoffen, Flüssigkeiten, Papier oder gar Metallpulver schichtweise die Körper auf, die ihre Konstrukteure vorher in gängigen 3D-Design-Programmen auf dem Computer erstellt haben. Bei den Formen sind der Phantasie so gut wie keine Grenzen gesetzt: Die neuen Kreationstechnologien erlauben aufgrund ihres sequentiellen Vorgehens die Herstellung verzwickter und geometrisch komplexer physischer Gebilde. »Mehrfach verschachtelte Käfige inklusive frei beweglicher Kugeln, bei denen man vergeblich nach Teilungsfugen oder Montageschnittstellen sucht, lösen immer wieder ungläubiges Kopfschütteln aus«, berichtet Rudolf Meyer, Koordinator der Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping. Die Leute würden nach Teilungsfugen oder Montageschnittstellen suchen, wo es doch einfach keine gibt: »Ist alles aus einem Guss«, sagt Rudolf Meyer, selbst noch voller Bewunderung.

Rapid Prototyping (RP) ist der ursprüngliche und bis heute oft verallgemeinernd gebrauchte Begriff für die leise begonnene Revolution in der Produktion. Ganz nüchtern versteht man darunter zunächst die schnelle Herstellung von Musterbauteilen ausgehend von Konstruktionsdaten. Wie der Name schon sagt, geht es zunächst um die automatische Fertigung dreidimensionaler Prototypen oder Modelle. Haupteinsatzpunkte sind traditionell beispielsweise die Auto- und Raumfahrtindustrie, die damit inzwischen kleine Einspritzpumpen genauso fertigen wie große Titanium-Bauteile für die Internationale Raumstation oder für Space Shuttles. Zunächst wird in diesem Rahmen immer ein Computermodell eines Objekts gebildet. Dieses wird

dann Schritt für Schritt bzw. Schicht für Schicht mit inzwischen gut zwei Dutzend unterschiedlicher Verfahren in die physische Realität umgesetzt. Die bekanntesten sind die *Stereolithographie* (vgl. S. 28), das *Laser-Sintern* (vgl. S. 31) und das *Fused Deposition Modeling* (vgl. S. 35). Das »rapid« im Namen der übergeordneten Technologien ist dabei relativ zu verstehen: Es dauert mehrere Stunden bis Tage, bis ein einzelnes Teil maschinell erstellt ist. In der Regel ist das aber immer noch schneller als in der klassischen industriellen Produktion.

Rapider Zuwachs in der Rapid-Familie

Die logische Fortsetzung von Rapid Prototyping ist das so genannte *Rapid Manufacturing (RM)*. Der Übergang zu dieser Form der *Rapid Production* gestaltete sich mit dem Reifen der RP-Technologien fließend, als sich solide Modelle verstärkt gleich als einsatzfähig für den Alltagsgebrauch erwiesen. Die im vorherigen Absatz genannten Beispiele weisen bereits auf die häufige Doppelfunktion der Rapid-Technologien hin. Dies zeigt sich auch in einem weiteren wichtigen Einsatzfeld, der Medizin. Dort haben im Rapid-Verfahren hergestellte Modelle etwa von den Köpfen siamesischer Zwillinge die Funktion von Demonstrations- und Übungsobjekten. Gleichzeitig werden auf genau dieselbe Art fabrizierte Gehörimplantate oder Zahnersatzkonstruktionen bereits direkt als maßgefertigte Endprodukte verwendet. Die Vorteile für den Patienten liegen auf der Hand: Ein Zahntechniker braucht bislang ein, zwei Arbeitstage, um anhand des Abgusses des lädierten Gebisses zunächst ein WachsmodeLL, daraus eine Gussform und schließlich den künstlichen Beißer zu schaffen. Vermisst man dagegen den Gebissabdruck oder einen ausgeschlagenen Zahn mittels Laserscan, kann per Rapid Prototyping aus Keramikrohstoffen in etwa einer Stunde eine passgenaue Krone geformt werden. Der Patient muss nach dem Vermessen keinen neuen Termin mehr vereinbaren, kann den Kunstzahn noch in derselben Sitzung eingepasst bekommen und zwischendurch eventuell ein paar Einkäufe erledigen.

Neben dem Rapid Manufacturing ist auch das *Rapid Tooling (RT)* ein Ableger der wachsenden RP-Familie. Dieses Schlagwort steht für die Erzeugung von Produktionswerkzeugen, in der Regel Spritzgussteile und -formen. Vorteil für den Auftraggeber: Die Vorserienwerkzeuge können direkt nach seinen Vorgaben und Daten innerhalb kurzer Zeit in den unterschiedlichsten Losgrößen und Materialien hergestellt werden. Neben dem Geschwindigkeitsvorteil ergibt sich ein Kostenvorteil gegenüber dem traditionellen Werkzeugbau vor allem bei kleinen und mittleren Serien. Am weitesten verbreitet als Materialien sind Silikon, der faserverstärkte Spezialkunststoff Epoxidharz und Aluminium.

Allen Formen der wachsenden RP-Familie gemeinsam sind ihr »virtueller« Ursprung aus elektronischen Computermodellen und der schichtweise Aufbau von danach gebildeten Gegenständen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Anwendung der Erzeugnisse, die sich vom Bereich der Modelle und Prototypen über den Werkzeugeinsatz bis hin zu Ersatzteilen und Produkten – oder zumindest Teilen davon – erstreckt.

Die Fertigungskette bei den Rapid-Verfahren, die in der Regel von einem Objekt in der physikalischen Welt ausgeht, dann ein Modell davon im Rechner erstellt und schließlich wieder ein greifbares Abbild, ein Double, generiert, hat die Fantasie so manchen Forschers angeregt. Der Prozess wird einerseits nur möglich durch die fortschreitende Computerisierung, Digitalisierung und Virtualisierung immer weiterer Lebens- und Wirtschaftsbereiche. Gleichzeitig bleibt er aber nicht im Reich der Einsen und Nullen stecken, sondern endet im vertrauten Bereich der mit allen Sinnen erfahrbaren Dinge und Körper. Es zeichnet sich also der Trend ab, die Vorteile der digitalen und der analogen Welt zu verschmelzen. Die Freiheiten des virtuellen Raums, in dem sich Gegenstände etwa frei formen lassen, werden zum Teil in die reale Materie geholt. Software erschafft Hardware.

Den Gedanken, Atome in Bits und diese wieder in Atome zu verwandeln oder, je nach Belieben, gleich ganz im Künstlichen zu beginnen, haben findige Unternehmer während des großen Internet-Hypes Ende der neunziger Jahre schon einmal auf die Spitze getrieben. Die kalifornische Firma DigiScents

stellte damals einen Duft-Synthesizer vor, der Gerüche über ein Zusatzgerät für den Computer verbreiten und so Internetseiten, Spiele, Songs oder Filme zu einem multisensuellen Ereignis der besonderen Art werden lassen sollte. Das Vorhaben sorgte für zahlreiche Schlagzeilen, »You've Got Smell« titelte das US-Magazin *Wired* beispielsweise im November 1999 und widmete den Geruchserzeugern eine lange Reportage. Die Idee materialisierte sich dann doch nicht, schon im April 2001 musste Digiscents aufgrund akuten Geldmangels aufgeben.

Die wahre Universal-Maschine

Das hat der Euphorie vieler Protagonisten der Bit-Atom-Wandlung allerdings keinen Abbruch getan. Forscher wie Neil Gershenfeld, der am MIT ein Institut mit dem bezeichnenden Namen *Center for Bits and Atoms*³ aufgebaut hat, gehen davon aus, dass auf den Personal Computer (PC) fast schon zwangsweise der *Personal Fabricator* (PF) folgt. So, wie die PC-Revolution die Informationsverarbeitung auf dem Schreibtisch ermöglichte, soll der PF nichts Geringeres als das Rapid Manufacturing in die eigenen vier Wände holen. Jedem Heim seine kreative Mini-Fabrik, lautet das Motto. Die sich weitgehend selbst versorgende Familie der Zukunft soll so ziemlich alles, was sie bisher von der Großindustrie bezog, am Computer generieren und über den PF verwirklichen. »Unter persönlichem Fabrizieren verstehe ich nicht nur das Erstellen mechanischer Strukturen«, stellt Gershenfeld klar. »Es geht vielmehr um voll funktionierende Systeme inklusive Fähigkeiten zum Messen und logischen Unterscheiden mit eigenem Operationsvermögen und Displays.« Eine Art Hausroboter als Produktionsmaschine.

An der Ambitioniertheit seiner Pläne lässt Gershenfeld keine Zweifel aufkommen: »Wir nähern uns dem Vermögen an, eine Maschine zu bauen, die jede erdenkliche Maschine fabrizieren kann.« Laborstudien wie die seines MIT-Kollegen Joe Jacobson hätten schon gezeigt, wie man die dafür benötigten Chips, Motoren und Sensoren mit Rapid-Verfahren gleichsam ausdrucken

könne. Tatsächlich ist es Jacobsons Team gelungen, winzige, nanometergroße Halbleiterpartikel zu entwickeln, die man in eine Druckerpatrone füllen kann. So lassen sich elektronische Schaltungen in Papier eingravieren, auch in mehreren Lagen übereinander. Die Auflösung ist gegenwärtig allerdings noch nicht hoch genug, um beispielsweise einen Pentium-Chip zu drucken.

Die digitale Manufaktur hält für die physikalische Welt vergleichbare Versprechen bereit, wie sie die Digitalisierung der Kommunikation und der Datenverarbeitung schon verwirklicht hat, ist sich Neil Gershenfeld sicher. So wie sich aus Ribosomen in unserem Körper komplexe Eiweißstrukturen bilden, lassen sich seiner Ansicht nach aus vielen kleinen, an sich unbedeutenden Rohstoffen »perfekte« Gebilde und Gebrauchsgüter erstellen. Was früher Sache von Ingenieuren war – wie etwa das Entwerfen von Schaltkreisen oder ganzer Maschinen –, würde sich inzwischen mit einer Ausrüstung im Wert einiger 1000 US-Dollar vom heimischen Schreibtisch aus erledigen lassen. »Momentan sind die Aufgaben in einer großen Firma aufgeteilt zwischen vielen Leuten und Abteilungen«, sagt der Bit-Atom-Wandler. »In der Zukunft wird der Besitz über die Mittel der Produktion nicht mehr länger ein Geschäftsmodell sein.« Mithilfe der Heimfabrik würden Produkte von und für Märkte entwickelt, die bis eine Milliarde US-Dollar schwer sind. Marx hätte sicherlich seine Freude am Personal Fabricator gehabt.

Um die Menschheit über den Stand des Übergreifens der Computerrevolution auf die physikalische Welt aufzuklären, hat Neil Gershenfeld ein Buch über die von ihm ins Leben gerufenen »Fab Labs« geschrieben. Diese Laboratorien sind ausgerüstet mit kommerziell bereits verfügbaren Rapid-Prototyping-Maschinen, aus denen sich schier alle auch nur erdenklichen Gegenstände formen lassen. An Bord sind außerdem unter anderem ein Lasergerät, das zwei- und dreidimensionale Strukturen ausschneiden kann, eine Software zum Programmieren einfacher Mikro-Controller, Halbleiter und Com-

Viele der aufregendsten
Möglichkeiten und Probleme
liegen an der Schnittstelle,
wo die Information
auf ihre physikalische
Repräsentation trifft.
Neil Gershenfeld (MIT)

puterchips sowie eine Stichsäge. Vernetzt sind die Geräte über Linux-PCs mit kostengünstiger und vollständig anpassbarer freier Software. Mit diesen Gerätschaften ist es laut Gershenfeld möglich, maschinelle Objekte auf den Millionstel Meter genau zu erstellen. Vor allem kleinen Genies in unterentwickelten Gebieten will Neil Gershenfeld mit den 25 000 US-Dollar teuren Labs die Möglichkeit an die Hand geben, ihrem Erfindungsgeist freien Raum zu geben.

Im Einsatz sind die Labs etwa bereits im indischen Kuhdorf Pabal. Die nicht weit entfernte ländliche Entwicklerorganisation und Forschungseinrichtung Vigyan Ashram war schon lange auf der Suche nach einem Sensor, mit dem sich der Fettgehalt in der Milch (an dem sich auch der Verkaufswert misst) sowie frühe Anzeichen des Verderbens erkennen lassen würden. Fabrikmäßig hergestellt gibt es ein derartiges Werkzeug bislang in Indien nicht zu kaufen. Jetzt produzieren es die Studenten von Vigyan Ashram genauso wie Tuning-Sets für Dieselgeneratoren oder Messgeräte für unterirdische Wasseradern in einem von Gershenfelds Fab Labs. In Ghana sind die Mini-Fabriken gleichzeitig im Einsatz, um die heimische Bevölkerung mit speziellen Buschmessern, Autoteilen oder Ackergerätschaften zu versorgen. Solargetriebene Werkzeuge sind in der Entwicklung. Im hohen Norwegen nutzen verbliebene Nomaden ein Lab, um Funkchips für ihre Herden und die Ausrüstung für den Aufbau drahtloser Netzwerke für die Übertragung der Signale in Eigenregie zu erstellen. Für die Anschubfinanzierung hat dabei bisher das MIT gesorgt. Jetzt geht Neil Gershenfeld unter anderem bei der Weltbank hausieren, um für das Weiterbestehen der Labs und die Förderung weiterer vergleichbarer Einrichtungen zu sorgen. Gleichzeitig versucht er große Drucker- und Elektronikhersteller wie Hewlett Packard oder Samsung sowie Softwarekonzerne wie Microsoft davon zu überzeugen, dass sich bei den Fabbern ein neuer Massenmarkt entwickeln könnte. Schenkt man Gerüchten im Internet Glauben, will zumindest HP tatsächlich noch 2005 auf den in Fahrt kommenden Zug aufspringen.

Die Arbeit der MIT-Forscher an einer viele andere Maschinen produzierenden und sich eventuell auch selbst reproduzierenden Einrichtung erinnert

an die Träume der Nano-Pioniere. Darin wimmelt es nur so von sich selbst vermehrenden Nano-Fabrikatoren. Hiervon unterscheidet sich Gershenfeld letztlich nur in der von ihm beobachteten und bevorzugten Methode zum Bau der Alleskönner. Seine Vorbilder sind die menschlichen Zellen, die seiner Ansicht nach ähnlich einem Computer bestimmte Programme laufen lassen, um für sich etwa einen Flagellarmotor zu fabrizieren. Die Programmiersprache der Natur will Neil Gershenfeld nun verstehen lernen und so dem Geheimnis der (Selbst-)Schöpfung auf die Spur kommen. Bei anderen Forschern wie dem Software-Experten Bill Joy schrillen angesichts solch ehrgeiziger Ziele derweil die Alarmglocken: »Warum die Zukunft uns nicht mehr braucht«, lautet sein aufsehenerregender Artikel⁴, der 1999 in *Wired* erschien und vor der Abschaffung des Menschen durch Roboter und Nano-Maschinen warnte.

Doch vom Rapid Prototyping zur digital-analogen Universalmaschine, die keine Grenzen der Kreation mehr kennt, ist es noch ein weiter Weg. Auch nüchterne Analysten wie Brock Hinzmann, Technologie-Navigator bei SRI Consulting Business Intelligence im Silicon Valley, sehen zwar mit Spannung auf die Verknüpfung von RP mit der Nanotechnologie. Beide würden schließlich auf additiv-konstruktiven Verfahren aufbauen, nur die Materialien würden sich auf der Molekülebene ganz anders verhalten. Was bei solchen Experimenten herauskommen würde, bleibt für Hinzmann aber eine vollkommen offene Frage.

Forscher wie Hod Lipson sind hingegen schon dabei, die »Mutter aller Maschinen« zu bauen. »Wir arbeiten an einem Roboter, der seinesgleichen baut«, sagt der Assistenzprofessor am Computational Synthesis Lab an der Cornell University im US-Bundesstaat New York selbstbewusst. Wie Manfred Dworschak in seinem Artikel »Die Mutter aller Maschinen« vom 20. Juni 2005 im *Spiegel* berichtet, soll Lipsons Rapid-Maschine bald selbst Batterien schon in einem Arbeitsgang fertigen. Zuerst druckt der Automat dabei den Boden aus Kunststoff, dann Plättchen von Zink und Kunstharz für die chemische Stromproduktion. Zu guter Letzt wird ganz oben das Gehäuse verschlossen. Die nötigen Materialien lagern rings um den Kran in Behältern, die an Druckerpatronen erinnern. Sie enthalten aber hochgezüchtete Kunststoffe, Kera-

mikpasten und Metallpulver. Der Fabrikator greift sich jeweils, was er als Nächstes braucht.

Noch ist selbst der Personal Fabricator Zukunftsmusik, auch wenn Vorstufen davon in Form von 3D-Druckern bereits als Serienprodukte verkauft werden. Sie funktionieren ähnlich wie Tintenstrahlgeräte. Ihre Vorlagen sind allerdings räumliche Computergebilde statt flächiger Bildschirmtexte. Und sie spritzen keine Tinte aufs Papier, sondern aus Tausenden von Düsen Mikroliter-Tröpfchen von Kunstharzen auf eine absenkbare Arbeitsplatte. Während diese nach unten wandert, wächst auf ihr das Modell Schicht für Schicht in die Höhe, ausgehärtet von einer UV-Lampe und gestützt von einem Kunststoffnetz, das am Ende des Fertigungsprozesses ausgewaschen wird. Entsprechende Geräte stellen unter anderem die US-Firmen 3D-Systems, Stratasys und Z Corp. her, aber auch das israelische Unternehmen Objet Geometries hat sich auf diesen Markt spezialisiert. Die 3D-Drucker lassen sich von normalen PCs steuern, sind aber meist noch so groß wie eine Tiefkühltruhe und damit weniger für den Heim-, als höchstens für den Bürogebrauch geeignet. Auch Preise im Bereich von mehreren 10 000 US-Dollar dürften Hobby-Designer vor einem Kauf noch zurückschrecken lassen.

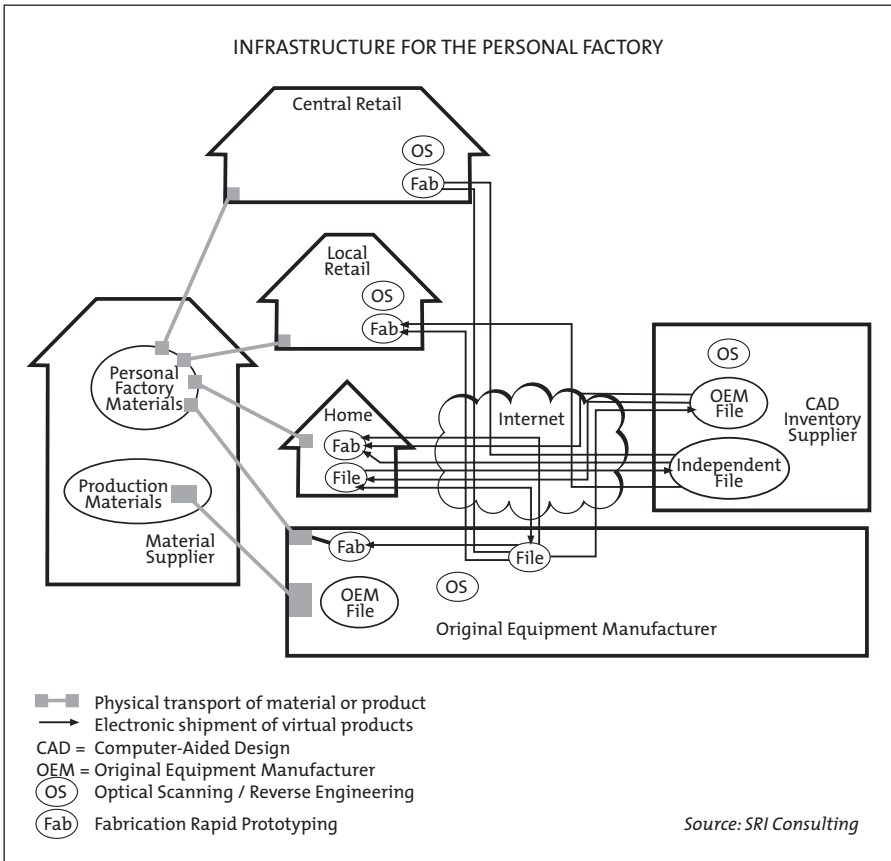
Davon völlig unbeeindruckt, erinnern die Verfechter der Idee des Personal Fabricator an die rasche Entwicklung von den frühen gigantischen Mainframe-Computern, die sich auch niemand freiwillig ins Home-Office gestellt

hätte, zu den PCs, Laptops und PDAs von heute. Für sie ist es nur noch eine Frage der Zeit, bis in zahlreiche Haushalte 3D-Drucker oder ähnliche RP-Geräte Einzug halten. Zum Kauf anreizen soll nicht nur der Gedanke, den abgebrochenen Fenstergriff oder Herdschalter ohne lange Debatten mit dem Kundenservice einer vielleicht schon pleite gegangenen Firma im Eigenbau zu Hause ersetzen zu

Wären Computer imstande, Atome so bequem zu manipulieren, wie sie Daten verarbeiten, könnten wir auch unseren sonstigen Alltag personalisieren.

Neil Gershenfeld (MIT)

können. Auch viele vollständig personalisierte, individualisierte und maßgefertigte Produkte könnten sich als Killer-Applikation der Mini-Fabriken er-



Die Infrastruktur für das Fabber-Home (Hinzmann 1996)

weisen: für die Kids die selbst umgestaltete Barbie-Puppe, für die sportlichen Eltern die dem eigenen Geschmack und Fuß angepassten Turnschuhe. Mass Customization würde in vielen Bereichen durch *Single* bzw. *Self Customization* ersetzt.

Der Physiker Marshall Burns gilt als der lautstärkste Anpreiser dieser Entwicklung. Sein im kalifornischen Santa Barbara angesiedeltes Beratungshaus Enn unterhält eines der umfangreichsten Online-Portale zum Thema »Fabbers«⁵, wie der Pionier seine »Digital Fabricators« liebevoll abkürzt. Seit

1992, als eine der ersten *Stereolithography Users Group Conference* in San Francisco stattfand, geht Burns mit dem Thema hausieren und hat eine beachtliche Summe an visionären Artikeln dazu geschrieben. Schon 1995 malte er etwa das Szenario eines Haushalts-Fabricators bzw. einer Heimfabrik aus. Demnach verfügen Häuser von 2008 an über einen eigenen Fabricator-Raum, der von einem »Netzwerk an unterirdischen Pipelines und Kanistern« gespeist wird.

Vergleichbar vielleicht am besten mit dem Röhrengeflecht der klassischen Rohrpost, sollen durch das pneumatische System die fürs Rapid Manufacturing benötigten Rohmaterialien komfortabel und automatisch angeliefert werden. Die Maschine selbst werde so ziemlich alle gängigen RP-Verfahren gleichzeitig beherrschen und traditionelle Fertigungsweisen wie Nähen oder Kleben obendrein. Damit würde dem Fabbing-Vergnügen nichts mehr im Wege stehen und der alte Traum von der sich selbst versorgenden soziologischen Einheit weitgehend Wirklichkeit werden: »Eine Maschine mit diesen Fähigkeiten könnte viele der physikalischen Bedürfnisse und Verlangen der ultramodernen Familien im Jahr 2008 befriedigen«, schrieb Marshall Burns. »Die fabrizierten Gegenstände dürften von der neuen Zahnbürste für die achtjährige Jenny, deren kleine Hand aus der für sie im vergangenen Jahr gefabften herausgewachsen ist, bis hin zu der Diamant-Sierra-Brosche mit einem geschmackvollen Spritzer Rubinrot reichen.«

Santa-Claus-Maschinen

Weniger Burns zweifelhaftes Hygieneverständnis – der kleinen Jenny sollte natürlich spätestens alle drei Monate ein neues Werkzeug für die Zahnsäuberung gefabbt werden – als vielmehr seine leicht naiv-missionarische Sichtweise der RP-Zukunft haben den Wahlkalifornier in der Technikergemeinde zu einer – wenngleich immer wieder gut vernehmbaren – Randfigur werden lassen. Vor allem die nach wie vor hohen Preise für RP-Maschinen, ihr begrenztes Verarbeitungsvermögen von meist nur einem Rohmaterial, ihre physische

Größe, ihre nicht immer leichte Bedienbarkeit sowie ihr teilweise höchstens befriedigender Qualitätsausstoß haben Fabbing-Euphorikern einen Dämpfer versetzt. Trotzdem bleibt der Gedanke von der auch im Heimbereich eingesetzten »Santa-Claus-Maschine«, die auch ungewöhnliche Konsumentenwünsche wahr werden lässt, im Hinterkopf der RP-Gemeinde präsent. Und sollten die 3D-Drucker schon nicht die häuslichen Schreibtische erobern, so sind sich die Experten doch einig, dass in diesem Fall Verbrauchern zumindest flächendeckend Servicebüros rund um alle RP-Belange schon bald zur Verfügung stehen werden. Wie der Durchschnittsverbraucher heute zum Copyshop um die Ecke geht, um rasch Vervielfältigungen anzufertigen oder längere Werke auszudrucken, wird er künftig zum Fabbing-Center eilen, wenn er ein maßgefertigtes Produkt oder nur mal eben einen Ersatztürgriff fabrizieren will. Der Kunde wird zum produzierenden Konsumenten – zum Prosumenten.

Keinen Zweifel hegen Fachgrößen auch daran, dass die RP-Techniken die Produktionsprozesse gewaltig verändern werden. Die Strömung vom Desktop

Ohne Zweifel werden in naher Zukunft Computer genutzt werden, um automatisch Objekte, Produkte und Systeme jeder Bauform und Art unabhängig von ihrer Komplexität herzustellen. Der Materialeinsatz für diese Fabrikationssysteme wird einfach aus Rohstoffen und Daten bestehen. Diese Technologie wird an das Desktop Publishing erinnern – aber anstatt von Dokumenten und Druckerzeugnissen werden diverse Produkte, die wir benötigen oder uns im Alltag wünschen, für uns auf der Stelle fabriziert. Es wird auch möglich sein, komplexe Gegenstände in kleinen Mengen ohne Werkzeugbereitstellung herzustellen – und zwar mit Materialeigenschaften, von denen wir heute nur träumen können.

Ed Grenda (Worldwide Guide to Rapid Prototyping)

Publishing zum Desktop Manufacturing scheint unaufhaltsam. Wenig nachgedacht wird dagegen über die sich abzeichnenden wirtschaftlichen und sozialen Folgen der RP-Revolution. Was ist zu erwarten, wenn der Homo Faber

sich zum Homo Fabber weiter entwickelt? Werden ganze Berufszweige im klassischen Handwerk plötzlich arbeitslos, weil sie mit der Heimfabrik oder dem Fabbing-Center doch noch die Folgen der Maschinisierung ereilen? Gerät die kapitalistische, auf Angebot und Nachfrage beruhende Marktwirtschaft gar aus den Fugen durch eine steigende Zahl an Prosumenten? Wie wird sich die klassische industrielle Fabrik verändern?

Im Folgenden werden derlei Fragen thematisiert, auch wenn sich sicherlich nicht überall bereits Antworten finden lassen. Davor steht ein Überblick über die vielen noch als Mysterium erscheinende RP-Technik mit ihren wichtigsten Spielarten. Es folgt ein Marktüberblick, eine Bestandsaufnahme mit Ausblick auf vielversprechende Applikationen sowie den größten aktuellen Barrieren und einem Einblick in die RP-Szene. Anschließend wird das gesellschaftliche und wirtschaftliche Umfeld mit seinen Leittrends wie der fortschreitenden Dezentralisierung und Individualisierung vorgestellt und herausgearbeitet, wie das Personal Fabricating dort hineinspielt. Im Abschlusskapitel geht es schließlich um die positiven und negativen Aspekte der sich abzeichnenden Fabbing Society.