



Dr. Katja Windt wurde am 4.6.1969 in Bonn geboren. Sie studierte Maschinenbau (Schwerpunkt Produktionstechnik) an der Universität Hannover und beendete das Studium im April 1995 als Diplom-Ingenieurin. Während ihres Studiums verbrachte sie ein Semester am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston (USA) und untersuchte dort den Prozess des Laserstrahlschneidens unter Einsatz verschiedener Materialien im Rahmen ihrer Studienarbeit.

Von Juni 1995 bis Juni 2000 arbeitete sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) in Hannover in der Gruppe Produktionsmanagement. Im November 2000 beendete sie ihre Promotion zum Thema „Engpassorientierte Fremdvergabe in Produktionsnetzen“. Seit März 2001 arbeitet sie als wissenschaftliche Assistentin am BIBA an der Universität Bremen im Bereich Intelligente Produktions- und Logistiksysteme. Seit Juli 2005 ist Frau Windt Mitglied in der Jungen Akademie und widmet sich der Erforschung interdisziplinärer Themenstellungen. Ab Juli 2006 übernahm sie die Aufgaben als Sprecherin der Jungen Akademie für ein Jahr lang. Sie erstellt zurzeit ihre Habilitationsschrift zum Thema „Gestaltung vernetzter Logistikstrukturen im Maschinenbau“ und ist Leiterin des Teilprojektes „Prozessorientierte Basisstudien zur Selbststeuerung“ im SFB 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen.

Dr. Ing. Katja Windt
Bremen Institute of Industrial Technology and Applied Work Science (BIBA)
Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme

Produktionstechnik 2020 – Zukunftsweisende Technologien, intelligente Produkte und innovative Prozesse

Der Maschinenbau ist die Grundlage jeder Produktion. Die Begriffe Maschinenbau und Produktionstechnik sind damit eng miteinander verknüpft. Die Produktionstechnik umfasst „alle technischen und organisatorischen Maßnahmen, Hilfsmittel und Methoden, die zur industriellen Herstellung von Produkten erforderlich sind“ (Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik 2005). Sie umfasst im Wesentlichen neben Fertigungstechnik und Montageverfahren auch das Anlagenmanagement, das von der Planung über den Betrieb bis zur Instandhaltung von Maschinen, Anlagen und Fabriken reicht, sowie das Produktionsmanagement. Neben diesen klassischen Aufgaben eröffnen sich für Ingenieurinnen und Ingenieure Aufgaben in produktionsangrenzenden Arbeitsbereichen, wie Logistik, Softwaremanagement und Vertrieb. Ingenieurinnen und Ingenieure sind die Bindeglieder zwischen neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen und ihrer Anwendung in der Praxis. Erst sie machen das Wissen nutzbar,

indem sie die Informationen in nutzbare Anwendungen übertragen (Akademischer Verein Hütte e.V. 2002). Der Verein Deutscher Ingenieure hat sich demzufolge als Leitbild die „Verbesserung der Lebensmöglichkeiten der Menschen durch Entwicklung und Anwendung technischer Mittel“ gesetzt (Verein Deutscher Ingenieure 2005).

Die deutsche Maschinenbaubranche bietet trotz der schwierigen wirtschaftlichen Situation in Deutschland Zukunftspotenzial. Der Trend, Fabrikanlagen im Ausland aufzubauen, bleibt deutlich erkennbar, jedoch exportiert kein Land so viele Maschinen ins Ausland wie Deutschland. Über zwei Drittel der gesamten deutschen Produktion verlassen die Landesgrenzen. Gleichzeitig ist der Maschinenbau mit zirka 885.000 Mitarbeitern der größte industrielle Arbeitgeber in Deutschland, erst dann folgen Elektrotechnik, Auto- und Chemieindustrie (VDMA 2004). Wird der Blick auf ganz Europa gelenkt, so zeigt sich, dass sogar 70 Prozent aller Arbeitsplätze in Europa mit der Produktion verbunden sind. Die Produktion oder produktionsnahe Dienstleistungen in mehr als 26 Millionen Unternehmen erwirtschaften europaweit rund 22 Prozent des Gross National Product (GDP) (European Commission 2004).

Doch es ist fraglich, ob Europa den Wettbewerbsvorsprung gegenüber China bei der Entwicklung innovativer Hochtechnologien halten kann. Der derzeitige EU-Forschungskommissar Potocnik gab zu bedenken, dass die Wachstumsrate der Forschungs- und Entwicklungsausgaben (FuE) seit 2000 in der EU praktisch bei Null angekommen ist, in China jedoch derzeit bei nahezu zehn Prozent liegt. Die Ausgaben für FuE steigen seit 2000 in China zehnfach schneller als das Bruttosozialprodukt, das seinerseits um zehn Prozent jährlich zunimmt. So nahmen die FuE-Ausgaben in China zwischen 2000 und 2003 um fast 20 Prozent zu. Nach Potocnik wird China, sofern dieser Trend anhält, spätestens 2010 Europa überholen (Friedrich 2005).

Aufbau des Beitrages

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel dieses Beitrages, die Produktion in Europa im Jahr 2020 auf Basis heutiger Entwicklungen zu beschreiben – welche Technologien werden verwendet, wie sehen intelligente Produkte aus und was kennzeichnet innovative Prozesse? Aufbauend auf einem *Szenario Produktion 2020* sollen die bestehenden Treiber technischer Entwicklungen erläutert werden, um im folgenden Kapitel die heutigen Innovationsfelder zu identifizieren, die eine Realisierung des Zukunftsszenarios ermöglichen könnten. Dabei werden die wesentlichen Trends der Produktion herausgearbeitet. Exemplarisch werden neue Technologien vorgestellt, die aller Voraussicht nach auch im Jahr 2020 eine entscheidende Rolle in der Produktion einnehmen werden.

Das folgende Szenario soll sich im Kern auf die Produktion im Jahr 2020 konzentrieren, wobei gesellschaftliche Entwicklungen, sofern diese auch Einfluss auf die Produktion haben, mit aufgegriffen werden. Die Inhalte des Szenarios entstammen aus mehreren Studien (Scharioth et al. 2004; European Commission 2004; Zäh et al. 2003; VDW 2002), deren Inhalte ergänzt wurden um aktuelle Entwicklungen im eigenen Fachbereich.

Szenario Produktion 2020

Produzierende Unternehmen im Jahr 2020 müssen den Anforderungen der Kunden in aller Welt gerecht werden. Der Industriestandort Europa hat dem globalen Wettbewerb im Jahr 2020 standgehalten und hat sich daher nicht zu einer reinen Handels- und Dienstleistungsgesellschaft entwickelt. Der Motor für Wirtschaftswachstum ist der Wissensvorsprung Europas hinsichtlich Produktentwicklung, Produktionsmethoden und Prozessmanagement. Die starke Ausrichtung der Wirtschaft auf Effizienzsteigerung führt zu einem anhaltenden Preisdruck bei niedrigen Lieferzeiten und der Sicherstellung einer hohen Termintreue. Zukünftig wird der anspruchsvolle Kunde individuelle Produkte verlangen, die nicht nur die gewünschte Funktion erfüllen, sondern sich in (selbst zu gestaltenden) Varianten des Designs oder zusätzlicher funktionaler Optionen unterscheiden, was zu einer unüberschaubaren Produktvielfalt führen wird. Um die zudem schnell

wechselnden Kundenbedürfnisse erfüllen zu können, sind schon heute sinkende Losgrößen erforderlich. Trotzdem stehen Unternehmen im Zwang, kostenoptimal produzieren zu müssen. Damit steht die Forderung nach Serientauglichkeit scheinbar im krassen Widerspruch zu der steigenden Variantenzahl und den sinkenden Losgrößen.

Innovative Produkte sind gekennzeichnet durch einen hohen Softwareanteil, den Einsatz neuer intelligenter Materialien sowie die Miniaturisierung von Komponenten. In der neuen (überalterten) Gesellschaft herrscht ein Lebensgefühl vor, welches sich durch Begriffe wie Geschwindigkeit, Veränderung, Differenzierung und Dynamik beschreiben lässt, was sich in einer ständigen Nachfrage nach neuen Produkten und Dienstleistungen widerspiegelt und dadurch zu immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen führt. Produktinnovationen mit langen Entwicklungszyklen sind nicht mehr profitabel, vor allem, da Gewinne in vielen Fällen von Nachahmern abgeschöpft werden. Aus diesem Grund finden Innovationen vergleichsweise häufig auf dem Gebiet der Produktions- und Logistikprozesse statt, die einen länger andauernden Kopierschutz europäischer Erzeugnisse darstellen. Es wird darüber hinaus zu einer deutlichen Trennung zwischen standardisierten preisgünstigen Massengütern einerseits und hochwertigen Luxusgütern andererseits kommen. E-Commerce ist dabei zu einem der wichtigsten Vertriebskanäle geworden, was zu kleinen Transporteinheiten und der Notwendigkeit individueller Logistiklösungen führt. Das Produkt wird über den gesamten Produktlebenszyklus betrachtet und Kosten für Verbrauchsmaterial, Wartung und Service werden unter Berücksichtigung der erwarteten Nutzungsdauer in die Kaufentscheidung einbezogen. Der Faktor Zeit ist gerade für vermögende Einkommensschichten zu einem elementaren Gut geworden. Dementsprechend müssen Produkte das Versprechen einer störungsfreien Verwendung einlösen, womit die Qualität der Produkte wesentliches Kaufkriterium bleibt. Die Forderung nach mehr Genauigkeit wächst zunehmend in Richtung Null-Fehler-Ziel. Dies zieht die Forderung nach einer verbesserten Prozesssicherheit mit sich (Scharioth et al. 2004; European Commission 2004; Zäh et al. 2003; Kuhfuß 2004a; Kuhfuß 2004b; VDW 2002).

Unternehmen nutzen Synergien in Netzwerken. Der internationale Wettbewerb führt dazu, dass lohnintensive Fertigungsschritte in Niedriglohn-

länder verlagert werden. Gesetze und Steueraufwände bewirken zudem, dass Unternehmen Produkte direkt an ihrem Verkaufsort montieren. Produktionsstandorte werden so zunehmend zu Montagestandorten. Die Produktion an verschiedenen Standorten mit drahtlos vernetzten Partnern in Netzwerken muss logistisch koordiniert werden. Dieses führt zu einer wachsenden Komplexität des logistischen Netzwerkes, die mit einem veränderten zeitlichen Verhalten in Verbindung gebracht und durch den Begriff der Dynamik gekennzeichnet wird. Neue Steuerungsstrategien zur Selbststeuerung werden dem Umgang mit dynamisch-komplexen Systemen gewachsen sein, die insbesondere die Produktion und die Logistik nachhaltig verändern werden. Autonome Entscheidungsfunktionalitäten werden auf einzelne Objekte wie Maschinen oder zu produzierende Teile verlagert und diese durch entsprechende Methoden und Technologien in die Lage versetzt, sich selbst zu steuern. So ist denkbar, dass die Teile eines Produktes selbst ihren Weg zum Montagestandort finden, ohne dass eine zentrale Steuerung hierfür alleine verantwortlich ist.

Unterstützend dazu ist die Gesellschaft geprägt durch eine selektive Offenheit gegenüber neuen Technologien, da ein offener Umgang mit möglichen Risiken vorherrscht und diese frühzeitig in die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eingebunden werden. Zum anderen stellt Sicherheit einen dominanten Wert dar, der dazu führt, dass man neuen Technologien der Überwachung oder Personenidentifizierung gegenüber aufgeschlossen ist (Scharioth et al. 2004).

Ebenfalls aufgeschlossen zeigt sich die Gesellschaft im Jahr 2020 gegenüber flexiblen Arbeitszeitstrukturen. Um dynamische Nachfrageschwankungen elastisch aufzufangen, existiert daher in Unternehmen ein flexibler Arbeitsmarkt. Sie unterscheiden zwischen einer fest angestellten Kernbelegschaft und einer mit flexiblen Verträgen versehenen Randbelegschaft. Je nach Nachfragesituation und je nach Grad der Flexibilisierung ihres Arbeitsvertrages werden die Arbeitnehmer per Internet über ihre aktuell benötigte Arbeitszeit informiert (Scharioth et al. 2004).

Nicht nur die Arbeitnehmer müssen flexibel agieren. Re-konfigurierbare, produktunabhängige und skalierbare Fertigungssysteme mit flexiblen Spannvorrichtungen und einer adaptiven Peripherie (zum Beispiel flexi-

ble Zuführtechniken) sowie mit integrierten Qualitätseinrichtungen (zum Beispiel selbst überwachende Produktion), die sich in bestehende Prozessstrukturen aufwandsarm integrieren lassen, werden die Produktion im Jahr 2020 kennzeichnen. Dies führt dazu, dass ganze Fabrikstrukturen wandlungsfähig gestaltet werden (Wiendahl 2004; Scharioth et al. 2004; Zäh et al. 2003).

Treiber technischer Entwicklungen

Zur Ausgestaltung des Szenarios aus Sicht der Produktionstechnik besteht zunächst der Bedarf, die heute bekannten Treiber technischer Entwicklungen zu identifizieren, die die zukünftigen Innovationsfelder maßgeblich gestalten werden. Als Innovationsfelder sind im Folgenden die für die Produktionstechnik wesentlichen Bereiche benannt worden, wie zukünftige Fertigungstechnologien, Maschinenkonzepte und Produktionssteuerungsverfahren beziehungsweise -organisation. Zu jedem Innovationsfeld sind die aus den Treibern resultierenden und aus derzeitiger Sicht zu erwartenden wesentlichen zukünftigen Entwicklungen beispielhaft dargestellt. Dabei kann nicht eindeutig ein Treiber zu Entwicklungen eines Innovationsfeldes zugeordnet werden. Auch die Unterscheidung zwischen Treiber und Innovationsfeld bleibt zum Teil unscharf. Beispielweise spielt die Logistik sowohl als Treiber als auch in Form neuer Produktionssteuerungsverfahren im Rahmen der Produktionsorganisation eine entscheidende zukünftige Rolle. Die folgende Abbildung gibt die Strukturierung der Abschnitte in Treiber und Innovationsfelder wieder.

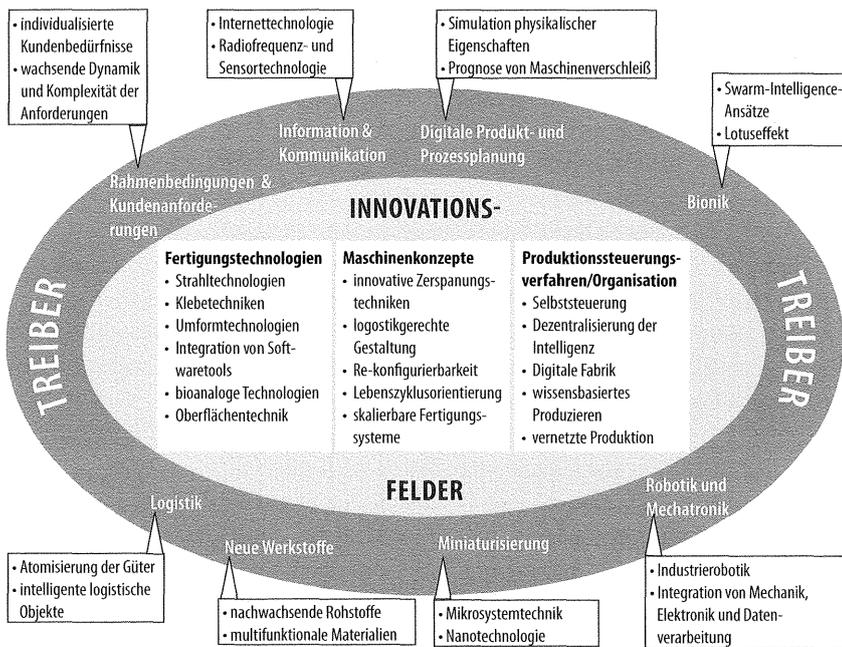


Abbildung 1: Innovationstreiber und -felder

Veränderte Rahmenbedingungen und Kundenanforderungen aus Sicht der Produktion

Globaler Wettbewerb

Der technologische Fortschritt selbst stellt heute einen der Gründe für die Globalisierung dar, die Unternehmen in einen weltweiten Wettbewerb einbindet (Kutschker et al. 2005). Flexibilität und Schnelligkeit werden neben einer lokal zentralisierten Produktion den Kern der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit ausmachen. Die Service-Orientierung der Produktion und das Nachfrageverhalten der Kunden werden sich künftig stark auf die Organisation der Produktion und Lieferketten sowie auf die Kundenbeziehungen auswirken. Asien und insbesondere China wächst zu einer leistungsstarken Macht auf dem globalen Markt heran. Viele Experten sehen darin auch eine Chance für das weltweite Wirtschaftswachstum, obwohl die Gefahr durch

die Verlagerung von Produktionsstandorten in so genannte Niedriglohnländer weiterhin besteht (European Commission 2004).

Dynamisches Unternehmensumfeld

Die extrem schnellen Entwicklungen in der Wissenschaft und Technik insbesondere in den Bereichen Nanotechnologie, Materialwissenschaft, Elektronik, Mechatronik, Informations- und Kommunikationstechnologie (I&K) sowie Biotechnologie fordern immer wieder neue Produktionsprozesse. Die einzelnen Naturwissenschaftsdisziplinen rücken dabei immer näher aneinander. Neue Berufsbezeichnungen wie Technomathematik und Bioinformatik sind nur zwei Beispiele für das Zusammenwachsen der bisher noch als separat geltenden Berufsdisziplinen.

Diese sich verändernde Ausgangssituation und das Nachfrageverhalten der weltweiten Kunden spiegeln sich wieder in der Veränderung der Leistungskennziffern. Den Kennzahlen „Time-To-Market“, „hohe Termintreue“ und „kurze Lieferzeit“ wird zunehmend Bedeutung beigemessen. Damit stellt sich die Frage, wie Produkte, Prozesse und Technologien an dynamische Bedingungen, wie stark schwankende Bedarfe oder kurzfristige Terminverschiebungen, anzupassen sind, und welche Anforderung die innovativen Produkte an die Prozesse stellen und umgekehrt innovative Prozesse und Verfahren an Produkte (VDW 2002).

Veränderte Umweltbedingungen

Die Produktion von morgen wird sich veränderten Umweltbedingungen und der vermehrten Forderung der Nachhaltigkeit gegenübersehen. Der Staat hat und wird weiterhin umweltspezifische Beschränkungen an Unternehmen richten und einen ökologischen und sparsamen Umgang mit Energie ebenso wie mit Ressourcen nicht nur fordern, sondern auch erzwingen. Die Unternehmen sind also gezwungen, um weiterhin am Markt bestehen zu können, ihre Produktionen noch effizienter zu gestalten oder sich neuen Tätigkeitsfeldern zu öffnen. Neben der staatlichen Regulierung wird die großrahmige Aufnahme neuer Technologien in das Produktionsumfeld aber auch von der Schaffung von Industriestandards abhängen (European Commission 2004). In der Gesellschaft steigt das Bewusstsein für die Bedeutung der Nachhaltigkeit und die mit der Produktion und Anwendung

von Produkten in Verbindung stehenden Umwelteinflüsse. Die global zunehmende Industrialisierung birgt die Gefahr, das ökologische Verhältnis zwischen Umweltbelastungen und Umweltentlastungen aus dem Gleichgewicht zu bringen. Prozess- und produktionsintegrierter Umweltschutz versucht, die bei der Herstellung von Produkten entstehenden Belastungen für die Umwelt zu minimieren. Entsprechende Maßnahmen sind etwa die Reduzierung von eingesetzten Rohstoffen und Zwischenprodukten sowie des Energieeinsatzes. Zudem sollen Reststoffe bei verfahrenstechnischen Prozessen nach Möglichkeit vermieden beziehungsweise ökologisch verträglichere Reststoffe erzeugt werden, die dann weiterverwendet werden können (Raebiger 2003; Raebiger et al. 2003).

Demographische Entwicklung in Deutschland und Europa

In Deutschland vollzieht sich derzeit ein Strukturwandel. Einerseits bewegt sich die Gesellschaft in Richtung Dienstleistung und andererseits in Richtung der wissensintensiven Branchen, wie zum Beispiel der Mikro- und Nanotechnologie, die auf dem Faktor Wissen im Gegensatz zu arbeitsintensiven Produkten beruhen. Diese werden sich laut Prognose zu den Erfolgsfaktoren der Industrieländer entwickeln (Prognose 2002). Die Produktion wird sich vermehrt an der soziodemographischen Entwicklung der Gesellschaft ausrichten. Ihre sozialen Forderungen und die Nachfragestruktur einer zunehmend älter werdenden Gesellschaft, der größere Anspruch an Mobilität und die erschwerten Arbeitsbedingungen werden sich in der Auslegung der Produktion niederschlagen. Es werden Konzepte unter ergonomischen Gesichtspunkten für die steigende Anzahl so genannter leistungsgewandelter Mitarbeiter benötigt. Dies sind solche Mitarbeiter, die wegen Einsatzeinschränkungen bestimmten Anforderungen und Belastungen am Arbeitsplatz nicht gewachsen sind, jedoch am passenden Arbeitsplatz und durch entsprechende Qualifizierungsmaßnahmen die volle Leistung erbringen können (Nyhuis et al. 2004). Solche Konzepte müssen auch den flexiblen Arbeitsstrukturen genügen, die zukünftig benötigt werden, wie zum Beispiel der hoch flexible Personaleinsatz in Abhängigkeit der dynamischen Nachfrageschwankungen.

Informations- und Kommunikationstechnologien

Internettechnologie

Das Internet ist ein wesentlicher Veränderungstreiber der Gesellschaft. Wie keine andere Technologie hat der Fortschritt im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien die Globalisierung beschleunigt. Der weltweite Austausch von Ressourcen zwischen und in Unternehmen wird durch sie erst ermöglicht. Häufig wird heute der physische Transport vollständig durch eine virtuelle Kommunikation ermöglicht. Alle Informationen sind schon jetzt an jedem Ort und sofort verfügbar. Nach Henzler (Kutschker et al. 2005) verdoppelt sich der Datenverkehr im Internet etwa alle 100 Tage. E-Mail-Kommunikationssysteme, Bankdienstleistungen, Online-Shopping und virtuelle Marktplätze sind nur einige Beispiele für den rasanten Fortschritt, den die Entwicklung der I&K-Technologien bislang mit sich gebracht hat.

Wireless Communication Networks

Als Kommunikationssysteme lassen sich alle Einrichtungen zur Unterstützung der Übermittlung von Informationen bezeichnen. Kommunikationsnetzwerke ermöglichen den Nachrichtenaustausch zwischen mehreren Teilnehmern. Für den kabellosen Datenaustausch haben sich in der jüngeren Zeit verschiedene Techniken herauskristallisiert. Neben WAP und Bluetooth werden vermehrt WLAN-Funknetze (Wireless Local Area Network, drahtloses lokales Netz) eingesetzt.

Radiofrequenz- und Sensor-Technologie

Zunehmend gewinnt neben der Mikrosystemtechnik auch die Nanotechnik an Bedeutung – sie macht auch ohne eigene Stromversorgung auskommende RFID (Radio Frequency Identification Technology) Tags und die Sensor-Technologie möglich (Mattern 2003). Aus technischer Sicht handelt es sich bei RFID-Tags um Transponder. Der Begriff Transponder setzt sich zusammen aus den Worten Trans-mitter und Re-sponder. Unterschieden werden passive und aktive RFID-Tags.

Damit ein solcher Tag in der Lage ist, nicht nur statische, sondern auch dynamische Informationen, etwa über seine derzeitige Position, weiterzugeben, sind Ortungssysteme notwendig, die mit dem RFID-Tag kommunizieren (Finkenzeller 2002).

Ortungssysteme

„Der Weg zum Ziel kann nur definiert werden, wenn der Standort bekannt ist.“ (Evers et al. 1999). Um ein logistisches Objekt (Paket, Bauteil in der Fertigung, Palette, etc.) in die Lage zu versetzen, sich selbst den optimalen Weg zu seiner Zielerreichung zu suchen, ist die Ortung, das heißt die Ortsbestimmung nötig. Denn erst die Möglichkeit, den eigenen Standpunkt zu orten, erlaubt es, einen Weg planbar zu machen. Die für militärische Anwendungen entwickelten Satellitenortungssysteme GPS – Global Positioning System – und GLONASS – Global Orbital Navigation Satellite System – machen die Astronavigation automatisierbar und anwendbar bei schlechter Sicht. Ihre Ortungsgenauigkeit liegt bei etwa zehn Metern. Die künstliche und natürliche Reduktion der Ortungsgenauigkeit kann sehr elegant und einfach durch Differentialmethoden beseitigt werden. Ein solches Verfahren stellt Differential-GPS (DGPS) dar, bei dem eine Genauigkeit von zwei Zentimetern in allen drei Koordinatenrichtungen erreicht werden kann. Das erste von der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) gemeinsam durchgeführte Projekt Ortung mittels Satelliten ist Galileo.

Digitales Engineering, Simulation und die digitale Fabrik

Computermodelle können innerhalb kurzer Zeit physikalische Eigenschaften unter realistischen Bedingungen simulieren und testen. In so genannten digitalen Fabriken werden Produkte und Produktionsverfahren berechnet und optimiert. Das wird synonym für die digitale Vernetzung der realen Fabrik und die virtuelle Produktion als digitale Abbildung der Fabrik und ihrer Bestandteile benutzt. Durch die Technologie der virtuellen Produktion lassen sich Entwicklungszeiten verkürzen und gleichzeitig die Qualität der Entwicklung erhöhen. Es werden virtuelle Prototypen von neuen Produkten erzeugt. Der Einsatz von Simulation erlaubt eine Prozessoptimierung durch bessere Parameter und die vollständige Abbildung der Eingangsgrößen. Gleichzeitig können Werkzeug- und Maschinenverschleiß und -versagen prognostiziert werden und somit die Wartungsmaßnahmen besser geplant werden (Kuhfuß 2004a). Ganze Fabrikgebäude werden in Form einer virtuellen Realität dreidimensional visualisiert, wobei die gesamte Logistikkette vom Lieferanten bis hin zum Endkunden betrachtet wird (Zäh et al. 2004).

Bionik

Bionik – ein Kunstwort aus Biologie und Technik – steht sinngemäß für das Lernen von der Natur für die Technik. Ergebnisse der biologischen Evolution werden dabei aus der Sicht eines Ingenieurs betrachtet. Bionik ist zu unterscheiden von der Biotechnologie, die insbesondere auf die Manipulation des Erbguts abzielt. Die Bionik versucht Technologien, die sich in der Natur erwiesen haben, zu imitieren. Die Beschichtung von beispielsweise Bootskörpern nach dem Vorbild von Delphinhaut stellt eine Senkung des Treibstoffverbrauchs in Aussicht, da sich der Widerstand deutlich vermindert. Die Beschichtung von Oberflächen nach dem Vorbild der Lotusblüte könnte die Vision von sich selbst reinigenden Oberflächen ermöglichen. Die Natur stellt somit auch ein Vorbild für die Werkstoffe der Zukunft dar. So werden heute Perlmutter-Imitate aus Aluminium und Titan erzeugt, die sich als extrem haltbar erwiesen haben. Sogar Software-Entwickler blicken auf das Tierreich. So versuchen sie die Fähigkeit von Ameisen zu kopieren, stets den kürzesten Weg zu einer Futterquelle zu finden, um damit das immer größer werdende Datenaufkommen zu bewältigen (Blüchel 2005; Nachtigal 2002). Solche Ansätze werden ebenfalls für die Entwicklung neuer Steuerungsverfahren für die Produktion aufgegriffen.

Robotik und Mechatronik

Mechatronik kombiniert mechanische, elektronische und datenverarbeitende Komponenten. Diese Ingenieurwissenschaft hält insbesondere in der Automobilindustrie Einzug. Zum Beispiel in Form von mechatronischen Bremsassistenten. Sie integrieren bei ABS (Antiblockiersystem) und ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) hydraulische Pumpen, mechanische Ventile, elektrische Sensoren und Mikrocomputer zu einem System (Heimann et al. 2001).

Auch ein Roboter stellt ein mechatronisches System dar, das alle Komponenten der Mechatronik – Mechanik, Elektronik und Informatik – integriert. Roboter übernehmen heute vielfältigste Aufgaben. Zum einen dienen sie schlicht der Gesellschaft. So bieten sie persönliche Hilfe etwa im Haushalt (Service-Robotik) an oder sie übernehmen zum anderen Aufgaben in der Industrie, die für den Menschen entweder zu gefährlich oder zu teuer sind. 2005 sind in der Industrie bereits weltweit über 750.000 Roboter im Dienst. In Zukunft werden immer mehr intelligentere Roboter hergestellt werden,

die in immer kleineren Auflagen für immer speziellere Aufgaben geeignet sein werden (Christaller et al. 2001; Scheppach 2001).

Miniaturisierung

Mikrosystemtechnik bedeutet die Verschmelzung von Optik, Mechanik und Sensorik auf kleinstem Raum. In vielen Bereichen der technischen Entwicklung lässt sich bei einer steigenden Miniaturisierung eine steigende Leistung beobachten (Scheppach 2001). Ein Notebook heute zeigt eine Rechenleistung auf, die mit einem Rechenzentrum vor zwanzig Jahren vergleichbar ist. Eine weitere Stufe der Miniaturisierung stellt die Nanotechnologie dar, welche sich zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt hat. Die Abmessungen reichen hier typischerweise von einigen zehn nm bis hinab zu atomaren Abmessungen von 0,1 nm. Nanomaterialien (zum Beispiel Carbon-Nanotubes integriert in Verbundwerkstoffe) stellen hierbei, neben Nanoelektronik und Nanobiotechnologie, einen der wichtigsten Trends für die Produktion dar (IFAM 2004).

Neue Werkstoffe

Neue Materialien erfordern neue Möglichkeiten in der Verarbeitung, und umgekehrt erfordern neue Anforderungen an Bauteile auch neue Anforderungen an Werkstoffe, wie zum Beispiel eine gute Zerspanbarkeit. Trends wie der Leichtbau im Flugzeugbau stellen ebenfalls neue Anforderungen an die Eigenschaften von Werkstoffen. Multifunktionale Materialien werden individuell maßgeschneidert (Materials Tailoring). Gelingt es nicht, ein homogenes Material mit allen Eigenschaften zu erzeugen, so lassen sich alternativ Lösungen mit einem Verbundwerkstoff finden. Die Eigenschaften der einzelnen Materialkomponenten ergänzen sich dabei gegenseitig, wie zum Beispiel in einem faser- oder partikelverstärkten Werkstoff (Scharioth et al. 2004). Die Entwicklung neuer Werkstoffe unterliegt dem gesellschaftlichen Anliegen, dem Aspekt der Nachhaltigkeit gerecht zu werden. Nachwachsende Werkstoffe, wie zum Beispiel naturfaserverstärkte Biopolymere (hergestellt aus Pflanzenölderivaten) spielen hierbei eine besondere Rolle, insbesondere zum Ersatz von konventionellen Kunststoffbauteilen wie Türverkleidungen im Auto (Scheppach 2001). Nach dem Vorbild der Natur werden biologische Materialien genutzt oder nachgebildet. Bei besonders beanspruchten Teilen kommen auch neue metallische Werkstoffe

zum Einsatz, zum Beispiel in Form nanostrukturierter Schäume, welches im Folgenden, neben weiteren innovativen Materialien, kurz erläutert werden soll.

Metallschaum: Advanced Pore Morphology (APM)

Der Werkstoffmetallschaum bietet aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaftskombination, wie zum Beispiel niedrige Dichte, exzellente Energieabsorption, gute Schall- und Vibrationsdämpfung und hohe Biegefestigkeit, eine ideale Basis für den Leichtbau. Für die Anwendung von Metallschaum in Verbundbauteilen ist die Technologie der Advanced Pore Morphology (APM) mit dem Ziel der Prozessvereinfachung entwickelt worden. Der APM-Prozess ist voll automatisierbar und weist eine hohe Flexibilität, Reproduzierbarkeit sowie Stabilität auf, woraus eine erhebliche Kostenreduktion folgt.

Metallschäume unterscheiden sich nur durch die metallische Matrix von Polymerschäumen. Das Metallschaumbauteil weist eine geschlossene Oberfläche und einen hochporösen oder auch zellularen Kern auf, vergleichbar mit dem menschlichen Knochen. Zwei Verfahren zur Herstellung von Metallschaum haben industrielle Bedeutung erlangt. Beim schmelzmetallurgischen Verfahren wird in Metallschmelze Gas eingebracht. Der so entstehende Metallschaum schwimmt wegen der geringeren Dichte auf der Metallschmelze und kann in so genannte Schäumwerkzeuge eingebracht werden. Der Schaum kühlt dort zunächst ab und kann entnommen werden. Beim zweiten, dem pulvermetallurgischen Verfahren wird ein Metallpulver mit einem so genannten Treibmittelpulver, wie zum Beispiel Titanhydrid, homogen vermischt und zu einem expandierbaren Vormaterial kompaktiert. Wird das expandierbare Vormaterial auf Schmelztemperatur des Metalls gebracht, setzt das Treibmittel bei der Erwärmung Gas frei. Sobald das Metall schmelzflüssig wird, expandiert das Gas die Schmelze zum flüssigen Metallschaum. Dieser Prozess kann in so genannten Schäumformen stattfinden, sodass der expandierende Metallschaum die Innenkontur der Schäumform annimmt (Busse et al. 2004).

Adaptive Strukturen

Eine weitere Entwicklung ist die Adaptronik (zusammengesetzt aus Adaptierung und Elektronik), die Schaffung adaptiver Strukturen durch intelligente Werkstoffe. Hier integriert man Sensoren und Aktoren in Verbundwerkstoffe. Die Basis stellen hierfür so genannte „intelligente Werkstoffe“ oder „smart materials“ dar. Solche Materialien haben die Fähigkeit über in- und externe Regler ihre Eigenschaften entsprechend den äußeren Einflüssen zu verändern beziehungsweise anzupassen (zum Beispiel Piezomaterialien oder Formgedächtnis-Legierungen: Metalle, die nach einer Verformung unter Temperatureinfluss wieder ihre ursprüngliche Form annehmen, verwendet unter anderem bei Brillengestellen) (Scharioth et al. 2004).

Magnesium

Insbesondere im Automobilbau, aber auch in vielen anderen Bereichen, zum Beispiel der Luftfahrt, werden Leichtmetall-Komponenten aus Magnesium als viel versprechende Entwicklungen der Zukunft gepriesen. Das Einsatzspektrum für diese Komponenten wächst stetig. Magnesium ist im Gegensatz zu Stahl und sogar Aluminium leichter und zudem vollständig recyclebar. Bei gleicher Belastbarkeit sind die Bauteile aus Magnesiumlegierung sogar leichter als Kunststoff. Wird Magnesium für elektronische Geräte eingesetzt, so ergibt sich neben der Gewichtsreduktion auch eine bessere elektromagnetische Abschirmung und Wärmeabfuhr als bei Kunststoffteilen (Venir 1998; Brungs et al. 1998; Niesig 2004).

Keramik

Keramische Werkstoffe haben schon heute in der Produktion die unterschiedlichsten Funktionen. Während Keramik hochbelastbar ist, ist sie zudem außerordentlich vielfältig und hält für die Zukunft der Technik noch viel Potenzial bereit. Hinter dem Begriff Keramik verbirgt sich zunächst einmal ein nichtmetallischer, anorganischer Werkstoff. Die keramischen Werkstoffe lassen sich unterteilen in die klassische Keramik (zum Beispiel Porzellan, Steingut), die aus Naturprodukten, wie zum Beispiel Ton oder Feldspat, hergestellt werden und die Hochleistungskeramik (HL-Keramik), hergestellt aus synthetischen Rohstoffen. Oxid- und Nichtoxidkeramik, keramische Verbundwerkstoffe, aber auch neue Ansätze wie beispielsweise Nano-Keramik und Smarte Keramik gehören zu dieser Gruppe. Keramische

Werkstoffe bringen im Gegensatz zu Metallen viele positive, aber auch negative Eigenschaften mit sich. Schon heute gibt es Bereiche, in denen sich die Keramik durch geringere Kosten, bessere Prozessbeherrschbarkeit oder höhere Qualität etabliert hat. So hat die Keramik bereits Einzug gehalten in die Bereiche der Bearbeitungswerkzeuge mit definierter Schneide, in die Gasturbinen-Entwicklung, den Motoren-, Maschinen- und Gerätebau und auch in die Wälzlagertechnik. Da die klassischen Werkstoffe durch die steigenden Leistungen von Maschinen und Apparaturen immer mehr an ihre mechanischen, thermischen, korrosiven und/oder abrasiven Leistungsgrenzen gelangen, öffnen sich für die HL-Keramiken weitere Anwendungsfelder. Neue Innovationen werden sich insbesondere durch die Kombination von funktionellen und strukturellen Eigenschaften ergeben. Werkstoff und Bauteil werden dann genau für das entsprechende System ausgelegt, sodass ihre Funktion optimal erfüllt wird. Im Bereich der Adaptronik werden mit Piezokeramiken elektrische Spannungen in minimale Längenänderungen umgesetzt, um beispielsweise die Kraftstoffeinspritzung positiv zu beeinflussen (Wöttig 2004; Grathwohl 2004; Harig et al. 1999).

Logistik

Nach Fleischmann (2002) unterscheidet man makro- (zum Beispiel Verkehrssysteme einer Region) und mikrologistische Systeme. Das mikrologistische System ist das logistische System eines Unternehmens oder ein Subsystem davon und wird schwerpunktmäßig in diesem Beitrag betrachtet. Logistische Systeme wirken im Sinne der Definition von Logistik. Logistik heißt (Seven-Rights-Definition nach Plowman), die Verfügbarkeit des richtigen Gutes in der richtigen Menge, im richtigen Zustand, am richtigen Ort, zur richtigen Zeit, für den richtigen Kunden und zu den richtigen Kosten zu sichern. Dabei bezieht sich die Logistik in Unternehmen auf die ganzheitliche Planung, Steuerung, Koordination, Durchführung und Kontrolle aller unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Güter- und Informationsflüsse. Die Aufgaben reichen dabei von der Auftragsannahme bis zum Versand. Die Beschaffungs-, Produktions-, Distributions-, Entsorgungs- und Verkehrslogistik sind dabei wichtige Teilgebiete der Logistik, die in alle Prozessketten und -kreisläufe einfließen (Klaus 1998). Ein weiteres charakteristisches Merkmal der Logistik ist zum einen, dass jedes

logistische System ein Informations- und Kommunikationssystem (I&K-System) benötigt. Dieses System ist Bestandteil des logistischen Systems, seine Gestaltung und Steuerung gehören zur Logistik. Zum anderen ist die gleichzeitige Betrachtung vieler Prozesse als Gesamt-Fluss in einem Netzwerk und in ihrer Abstimmung auf Gesamtziele eines Systems der Logistik eigen (Fleischmann 2002).

Die Globalisierung der Märkte führt dazu, dass Unternehmen zunehmend Teile ihrer Produktion in Länder verlagern, in denen kostengünstiger produziert werden kann. Aufgrund gesetzlicher Rahmenbedingungen wie Zölle und Steuern wird vor allem die Montage in Länder verlagert, in denen das Produkt verkauft werden soll. Das Outsourcing von Teilen und Komponenten in andere Unternehmen führt in Kombination mit den eben genannten Gründen dazu, dass Produktionsunternehmen zunehmend zu Montageunternehmen werden. Dies alles stellt die Logistik unternehmensübergreifend in Produktionsnetzwerken als auch unternehmensintern, die Planung und Steuerung, vor neue Herausforderungen. Die hohe Variantenanzahl von Produkten, die in solchen Produktionsnetzen mit unterschiedlichen Partnern produziert werden, erhöht die Komplexität der Auftragsabwicklung. Hinzukommen unplanbare dynamische Einflüsse, wie Änderungen von Kundenvorgaben, Ausfall von Maschinen und Terminverzögerungen von Lieferanten. Neue Technologien wie die Radiofrequenztechnologie revolutionieren zurzeit die Logistik. Transponder (siehe oben) werden auf Produkte, Pakete oder Paletten geklebt und fortan können Informationen des zugehörigen Auftrages oder Paketes jederzeit über den Transponder berührungslos ausgelesen werden. Eine lebenszyklusorientierte Verfolgung einzelner Teile oder Pakete wird möglich. Übertragen auf einen Produktionsbetrieb ist denkbar, dass die Teile eines Produktes selbst ihren Weg durch die Fertigung bis hin zum Montagestandort finden. Diese Technologie wird die Barcodetechnologie in der Zukunft weitestgehend ablösen. Es bedarf jedoch neuer ganzheitlicher Konzepte, um diese neue Technologie durch neue Steuerungsstrategien in Softwaresystemen zu integrieren. Das Potenzial dieser Technologie auch in Verbindung mit der Sensortechnik muss zukünftig erschlossen werden, um die Erreichung logistischer Zielgrößen, wie eine hohe Termintreue bei kurzen Lieferzeiten und wettbewerbsfähigen Kosten, sicherzustellen.

Innovationsfelder neuer Produktionstechnologien

Die genannten Treiber führen zu neuen Innovationsfeldern. Zu jedem Innovationsfeld seien im Folgenden Thesen benannt, die die Entwicklungen der Zukunft aufgreifen und Fertigungstechnologien, Maschinenkonzepte sowie neue Steuerungsverfahren der Produktion als Kern-Innovationsfelder beschreiben.

Fertigungstechnologien der Zukunft

Thesen

- Neue Werkstoffe erfordern neue Fertigungstechnologien und Fertigungsverfahren für die Ver- und Bearbeitung, wie zum Beispiel nachwachsende Rohstoffe, Keramik und Magnesium.
- Laser werden als Präzisionsobjekt in der Produktion eine Schlüsselrolle einnehmen. Sie werden nicht nur zur Bearbeitung, sondern auch zur Prüfung und schließlich als Bestandteile eines Produktes zum Einsatz kommen.
- Produktionsprozesse werden weiterhin zunehmend von Rechnersystemen unterstützt.
- Eine Vielzahl von technologischen Innovationen wird auf bioanalogen Technologien beruhen.
- Neue Technologien (zum Beispiel der Klebtechnik) werden spezifische Industriebranchen (zum Beispiel Flugzeugbau) in Kombination mit neuen Materialien revolutionieren.

Die Vielzahl der Anforderungen der dynamischen Umwelt und die sich daraus ableitenden Trends für Werkzeugmaschinen und Prozesse spiegeln sich wieder in einer noch größeren Vielzahl von Entwicklungstrends der einzelnen Fertigungstechnologien. Im Bereich der Produktionstechnologien basieren sämtliche Tätigkeiten, die mit dem Problemlösen verbunden sind, auf den grundlegenden Fertigungsverfahren, die in der DIN 8580 beschrieben sind (Abbildung 2). Die Einteilung orientiert sich anhand der Merkmale Schaffen von Form (Urformen), Ändern der Form (Umformen, Trennen, Fügen und Beschichten) sowie Ändern der Stoffeigenschaften.

In jeder dieser Untergruppen gibt es Verfahren, die aus heutiger Sicht als zukunftsweisend gelten. Stellvertretend seien einige dieser Technologien im Folgenden vorgestellt: Präzisionslaserstrahlsintern (Urformen), Innenhochdruck-Umformen (Umformen), das Laserstrahlschneiden (Trennen), Laserstrahlschweißen und rechnergestützte Methoden der Klebtechnik (Fügen), Ändern und Nutzen magnetischer Eigenschaften (Stoffeigenschaften ändern) sowie der Lotus-Effekt (Beschichten) (Abbildung 2).

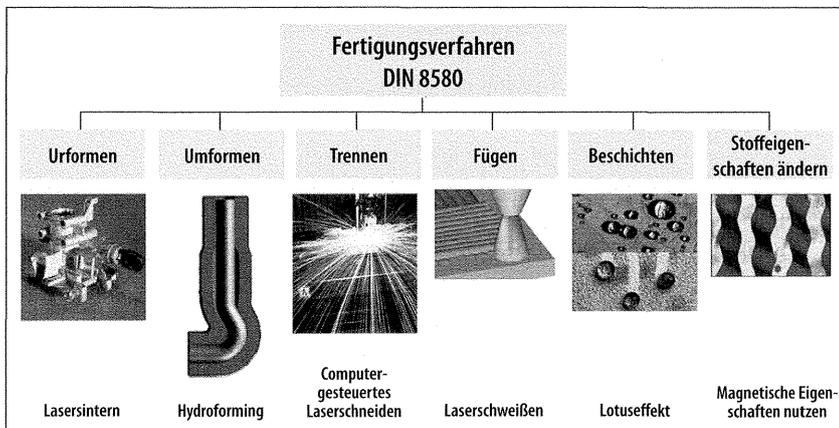


Abbildung 2: Neue Produktionstechnologien (Auswahl)

Laserstrahltechnologien

Der Laser ist zu einem präzisen Werkzeug der Produktion geworden und übernimmt immer mehr Aufgaben. Beim Lasersintern werden in einem Pulverbett angeordnete Partikel durch einen Laserstrahl lokal aufgeschmolzen. Beim Abkühlen erstarren sie und bilden eine feste Schicht. Anschließend wird eine neue Schicht Pulver aufgetragen und das Werkstück wieder neu positioniert. Mit dieser Methode lassen sich in kürzester Zeit qualitativ hochwertige Werkstücke erzeugen (Westkämper et al. 2004; Klocke et al. 2005).

Weil der Laser ein sehr präzises und schnelles Schneidwerkzeug darstellt, das Metalle präzise und schnell schneidet, hat er sich bereits in der fle-

xiblen Blechverarbeitung bewährt, wenn komplexe Geometrien sowie eine schnelle Verarbeitung gefordert sind. Im Gegensatz zu anderen Verfahren ist das Laserschneiden auch schon bei niedrigen Losgrößen wirtschaftlich (Semrau 1990).

Unterschiedliche Werkstoffe erfordern unterschiedliche Verfahren. Allein für das Schweißen von Metallen sind heute unzählige Möglichkeiten bekannt. Das Laserschweißen jedoch ist zukunftsweisend. Dabei wird ein Laserstrahl auf das Werkstück fokussiert und erwärmt es auf die Schweißtemperatur und bringt das Metall zum Schmelzen und Verdampfen. Über die Schweißstelle wird dabei Schutzgas geleitet, um das Werkstück zu schützen. Die entstehenden Schmelzen fließen hinter dem Laserstrahl ineinander, durchmischen sich und erstarren. Herkömmliche Schweißtechniken erreichen nicht den bei diesen Verfahren erzielbaren Tiefschweißeffekt. Ein weiterer Vorteil ist, dass Werkstücke nahezu beliebiger Geometrie bearbeitet werden können (Westkämper et al. 2004; Dilthey 2000; Wagner 2004).

Der Weltmarktumsatz mit Laservorrichtungen stieg im letzten Jahr um 20 Prozent auf 2,7 Milliarden Euro. Intensiv wird nach neuen Lasermaterialien gesucht mit neuen Wellenlängen, mit besserer Effizienz, höherer Leistung und einem breiteren Lichtspektrum. Dabei zeichnet sich ab, dass der Trend kurz- bis mittelfristig zu Kristalllasern geht. Sie sind kompakter, einfacher zu handhaben und zuverlässig. Langfristig jedoch ist mit einer völlig neuen Lasergeneration zu rechnen. Der so genannte Orgo-Laser ist ein Hybrid aus organischem und anorganischem Material und bei weitem kostengünstiger herzustellen als heute übliche metall-basierte Laser (Proprawe et al. 2004; Scheppach 2001).

Rechnergestützte Methoden der Klebtechnik

Weitere innovative Techniken für das Fügen von Werkstoffen stellen rechnergestützte Methoden der Klebtechnik dar. Ein wesentlicher Vorteil der Klebtechnik besteht in der Funktionsintegration. Neben der Eigenschaft, Füge­teile durch Adhäsion und Kohäsion stoffschlüssig miteinander zu verbinden und somit die Strukturfestigkeit zu erhöhen, lassen sich geometrische Toleranzen der Füge­teile bis zu einem gewissen Grad kompensieren. Um die hohen Qualitätsanforderungen bezüglich Stabilität und Vermeidung von Beschädigungen zu erfüllen, soll die Passgenauigkeit erhöht und

eine toleranzangepasste Klebstoffapplikation mit reproduzierbarer Qualität entwickelt werden. Dazu wird die Oberfläche der Teile zuerst optisch vermessen, sodass ein dreidimensionales Abbild der tatsächlichen Geometrien vorliegt. Diese Daten werden aufbereitet mit Hilfe einer neu entwickelten Software und in einer Datenbank abgelegt. Anschließend wird eine Passungsanalyse zwischen den digitalen Bauteilen am Rechner durchgeführt. Aus den ermittelten Passdaten wird vom System automatisch ein Bewegungsprogramm für einen Industrieroboter erstellt (Hennemann et al. 04).

Innenhochdruckumformung (IHU)

Unter Hydroforming oder auch Innenhochdruckumformung (IHU) wird das Aufweiten metallischer Rohre durch Wasserdruck verstanden. Mit bis zu 4000 bar Wasserdruck werden die Rohre wie eine Art Luftballon von innen geweitet. Das Werkzeug wird dabei im Allgemeinen durch eine hydraulische Presse geöffnet, geschlossen und zugehalten. Mit dieser Technik lassen sich sehr komplexe Hohlkörper aus einem Werkstück herstellen und seine Wanddicken sehr genau einstellen. Zudem zeichnen sich die so bearbeiteten Bauteile durch eine hohe, gleichmäßige Festigkeit und Steifigkeit aus (Goche et al. 2005).

Lotus-Effekt

Auf der Suche nach der Ursache, dass bestimmte Pflanzenoberflächen wie die Blätter der indischen Lotusblüte, Kohlblätter oder die Kapuzinerkresse nicht von Wasser benetzt werden und dazu völlig schmutzabweisend sind, entdeckten Forscher, dass feinste Erhebungen auf der Oberfläche der Blätter den so genannten Lotus-Effekt verursachen. Bisher war dieser physikalische Effekt unbekannt. Durch die Rauigkeit im elektronenmikroskopischen Bereich ist die Kontaktfläche mit Schmutzpartikeln so gering, dass sogar völlig wasserabweisende Substanzen von Wassertropfen quasi abgewaschen werden. Aus technischer Sicht müssen Verfahren und Materialien zur Beschichtung gefunden werden, um diesen Effekt zu erzeugen. Pyogene Kieselsäure, ein durch einen Flammprozess erzeugtes Siliziumoxid, wird heute dazu eingesetzt. Eine Möglichkeit zur Aufbringung auf das Werkstück stellt das Einbringen feiner Partikel in organische Suspensionen oder Gele dar, die auf die Oberfläche aufgetragen werden und beim Aushärten eine organische Matrix bilden, die die erforderliche Rauheit besitzt (Dambacher 2003).

Änderung und Nutzung magnetischer Eigenschaften

Materialien mit magnetischen Eigenschaften sind in der Produktionstechnik von großem Interesse. Die magnetische Datenspeichertechnologie versucht, immer größere Datenmengen auf immer kleineren Medien dauerhaft zu speichern. Bisher werden ferromagnetische Materialien wie zum Beispiel Kobalt eingesetzt, jedoch müssen, um noch mehr Daten abzuspeichern zu können, auch verstärkt neue Materialien und damit auch neue Technologien eingesetzt werden. Hierzu wird heute Ionenbestrahlung eingesetzt, um extrem dünne Schichten mit neuen magnetischen Eigenschaften herzustellen (Bohnet 2005).

Maschinenkonzepte der Zukunft

Die vorgestellten und zukünftigen Technologien müssen in Maschinenkonzepten aufgegriffen und umgesetzt werden. Die Werkzeugmaschinenindustrie steht heute einem sich dynamisch verändernden Fertigungsumfeld gegenüber. Die Anforderungen an Qualität, Dynamik, Prozessführung und Flexibilität wachsen. Neue Werkstücke, ob gemäß der Geometrie, elektronischer Eigenschaften oder der Größenordnung, bringen häufig die Verwendung neuer Werkstoffe mit sich. Diese neuen Werkstoffe erfordern neue Fertigungsverfahren und -einrichtungen, die in bestehende oder neu zu gestaltende Prozessketten zu integrieren sind.

Thesen

- Zur Verkürzung von Lieferzeiten werden höhere Zerspankräfte und Vorschubgeschwindigkeiten benötigt.
- Es wird eine Lebenszyklusorientierung der Technologien zur Schaffung robuster Produktionsanlagen, die der Marktdynamik beispielsweise hinsichtlich Re-konfigurierbarkeit und Skalierbarkeit gewachsen sind, verfolgt.
- Neue Maschinenkonzepte integrieren Qualitätseinrichtungen.
- Zukünftig wird die logistikgerechte Gestaltung von Technologien in Fertigung und Montage an Bedeutung gewinnen.

Innovative Zerspanungstechnik

Langfristig lassen sich in der Zerspanungstechnik drei Arten von Trends unterscheiden. Ökologische Trends fordern den Einsatz von Minimalmengekühlschmierstoffen oder der Trockenbearbeitung sowie die Minimierung des Energieeinsatzes. Der Trend zur Entwicklung von Werkzeugen und Kühlschmierstoffen, die Kombination von verschiedenen Bearbeitungstechniken auf einer Maschine und das Wissensmanagement zur Beherrschung von Prozessen lassen sich zu einem organisatorischen Trend zusammenfassen. Zu den langfristigen technologischen Trends gehören ebenso die gezielte Nutzung von Reaktionsschichten, der Einsatz von Modellen und Simulationen und Mikro-Sensorik sowie die Kombination von geometrisch bestimmten und unbestimmten Werkzeugkonzepten. Zur weiteren Verkürzung von Durchlaufzeiten werden zurzeit hybride Maschinenkonzepte vor allem in Deutschland verfolgt. Hier werden verschiedene Prozesse zur Bearbeitung unterschiedlicher Bauteilbereiche in einer Maschine kombiniert, zum Beispiel Dreh- und Schleifoperationen in einer Aufspannung ermöglicht (Brinksmaier&Meyer 2004; Walter 2001). In den USA und Japan werden im Gegensatz dazu überwiegend einfache Maschinenkonzepte, das heißt die Bearbeitung jeweils einer Funktion auf einer Maschine, favorisiert und so verschiedene Maschinen flexibel kombiniert. Beide Konzeptvarianten werden auch im Jahre 2020 bestehen. Neue ganzheitliche Bewertungssysteme werden die optimalen Einsatzbedingungen für die jeweilige Variante aufzeigen. Darüber hinaus werden durch eine adaptive Prozessregelung unter Einsatz intelligenter adaptronischer Komponenten selbstüberwachende und -regelnde Maschinen geschaffen (VDW 2002).

Flexibel re-konfigurierbare Maschinen und Produktionssysteme

Flexibel re-konfigurierbare Maschinen und Produktionssysteme sollen den Widerspruch zwischen den unterschiedlichen Zielgrößen kürzerer Produktlebenszyklus und Kostenintensität von Investitionsgütern auflösen. Flexibilität der Fertigungssysteme durch Re-konfigurierbarkeit und Skalierbarkeit sollen die Investitionsaufwendungen reduzieren und gleichzeitig den Nutzungsgrad optimieren. Eine hohe Mengenflexibilität, ein optimaler Umgang mit Werkstoffvariation, kurze Umstell- und Umrüstzeiten sowie

eine Flächenminimierung und die Reduzierung des Instandhaltungs- und Lageraufwandes sind damit die sich ableitenden Kriterien für die innovativen Produktionssysteme. Zur Erreichung dieser Ziele müssen ganze Prozessketten re-konfigurierbar ausgelegt werden.

Als Grundlage für die Re-konfigurierung und Skalierung lassen sich damit Modularisierung und Standardisierung ableiten. Passfähige Komponenten, standardisierte Schnittstellen und adaptive Spannsysteme erlauben, Umstell- und Umrüstprozesse so kurz wie möglich zu halten und Prozess- und Mengenflexibilität zu gewährleisten. Die technologische Erweiterbarkeit als auch die Anpassbarkeit der Maschine an die Bearbeitungsaufgabe und an komplexe Werkstückgeometrien sollen somit zukünftig erfüllt werden. Etwa durch den Einsatz von mechatronischen Modulen können die einzelnen Module mit einer Eigenintelligenz versehen und über standardisierte Schnittstellen verbunden werden, sodass eine Gesamtanlage aus modular konzipierten Komponenten flexibel und re-konfigurierbar verkettet wird (Kuhfuß 2004a; VDW 2002).

Unter dem Aspekt des logistikgerechten Gestaltens von Produktionstechnologien kommen zudem Anforderungen an die Integrier- und Synchronisationsfähigkeit dazu (Abbildung 3). Neue Maschinenkonzepte müssen durch technologische Vorkehrungen der Wandlungsfähigkeit von Fabrikstrukturen gerecht werden, indem sie sich mit wenig Aufwand an verschiedenen Standorten positionieren lassen. Hinsichtlich der Synchronisation mit bestehenden Prozessen ist es notwendig, dass neue Prozesse zeitlich in den Ablauf zu integrieren sind. Neue beschleunigte Prozesse können dazu führen, dass Bestände an Folgearbeitssystemen wachsen werden, da diese kapazitiv nicht in der Lage sind, die höhere Anzahl an Aufträgen abzuwickeln. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass das neue Arbeitssystem mit Aufträgen aus vorgelagerten Arbeitssystemen versorgt werden kann. In beiden Fällen führt dies zur Vorhaltung von entkoppelnden Pufferlagern. Auch der Grad der Automatisierung muss aus logistischer Sicht kritisch betrachtet werden, da ein hoher Automatisierungsgrad in der Regel zu einem Verlust an Flexibilität zum Beispiel hinsichtlich der Fertigung unterschiedlicher Produktvarianten führt.

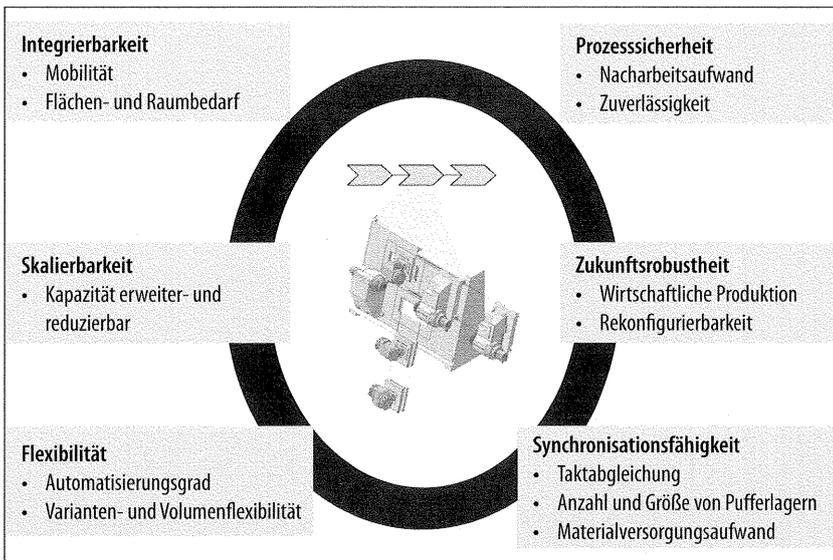


Abbildung 3: Logistikgerechte Gestaltungsfelder für zukünftige Maschinenkonzepte

Produktionssteuerungsverfahren der Zukunft

Die Aufträge der Kunden eines Unternehmens müssen in der produktabhängigen Vielzahl ihrer Varianten in möglichst kurzer Zeit durch die Fertigung gesteuert werden, sodass die Einhaltung des zugesagten Kundentermins sichergestellt werden kann. Derzeitige Steuerungsmethoden und -systeme erweisen sich beim Umgang mit den aufgezeigten dynamisch-komplexen Problemstellungen als unzureichend. Das in der Regel sukzessive Vorgehen bei zentral ausgerichteten Planungsprozessen wird den dynamischen Anforderungen nicht mehr gerecht. Schon nach kurzer Zeit stimmen die Planvorgaben nicht mehr mit den Realdaten überein. Die Rückführung der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Realprozess wird nur unzureichend oder zu langsam auf den Planungsprozess im Sinne einer Regelung vorgenommen (Horváth 2002). Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in einer realitäts- und zeitfernen Erfassung von Daten (Roos 2003).

Thesen

- Selbststeuerung führt unter Einsatz neuer Technologien Informations- und Materialfluss in Produktions- und Logistiksystemen zusammen, wodurch sich die Transparenz vernetzter Materialflussstrukturen erhöht.
- Durch Verlagerung von Entscheidungskompetenz auf einzelne logistische Objekte wird die Robustheit komplexer nicht-deterministischer Systeme erhöht und schafft es, den Aufwand zur Durchführung von Planungsfunktionen auf ein Minimum zu reduzieren.
- Individuelle Logistik basiert auf durchgängiger Nachverfolgbarkeit der intelligenten Produkte sowie der Teile in der Produktentstehung. Informationen sind zu jeder Zeit an jedem Ort verfügbar.
- Forschungsansätze zu Steuerungsverfahren aus der Natur werden weiter intensiviert werden.
- Die Digitale Fabrik wird zukünftig die gesamte Prozesskette in einer digitalen Repräsentation abbilden und darüber hinaus durch ein wissensbasiertes Produzieren Wissen zwischen kooperierenden Unternehmen verfügbar machen.
- Produzieren in internationalen Wertschöpfungsnetzwerken wird die Zukunft bestimmen. Das wissensbasierte Produzieren wird dabei eine Schlüsselrolle einnehmen.

Selbststeuerung

Derzeit findet ein Paradigmenwechsel hin zu neuen Steuerungsstrategien statt, der insbesondere die Produktion und die Logistik nachhaltig verändern wird. Kern der Idee der so genannten Selbststeuerung ist, im Unterschied zu bestehenden zentral und hierarchisch ausgerichteten Planungs- und Steuerungsansätzen dezentrale und heterarchische Steuerungsmethoden zu entwickeln, die es erlauben, zeitnah und effizienter auf Veränderungen im komplexen Umfeld zu reagieren. Autonome Entscheidungsfunktionalitäten werden auf einzelne Objekte wie Maschinen, zu produzierende Teile oder auch Pakete verlagert und diese durch entsprechende Methoden und Technologien in die Lage versetzt, sich selbst zu steuern (SFB0637 2004, Scholz-Reiter 2004). Kern der zukünftigen Entwicklungen wird sein, festzulegen, wie viel Selbststeuerung sinnvoll und notwendig

ist und bis zu welcher Grenze Fremdsteuerung weiterhin zentral ausgeübt werden wird. Intelligente Produkte, ihre Teile und Komponenten navigieren sich zukünftig selbststeuernd durch die Fertigung.

Intelligente logistische Objekte

Intelligente logistische Objekte sind Gegenstände der Logistik auch in der Produktion, wie Aufträge, Produkte, Arbeitssysteme, die die Fähigkeit zu kommunizieren und zur Informationsverarbeitung besitzen. Technologien dienen hierbei als Befähiger, wie die bereits erwähnte RFID-Technologie (Radio Frequency Identification Technology) (Finkenzeller 2002; Shepard 2004; Westkämper&Jendoubi 2003). Intelligente logistische Objekte mit der Fähigkeit, für sich selbst Entscheidungen zu treffen, sind Grundlage der Selbststeuerung.

Als intelligente Objekte werden auch alltägliche Gegenstände bezeichnet: Intelligente, smarte, drahtlos vernetzte Gegenstände, Pervasive, Ubiquitous Computing – hierunter wird die Vision verstanden, dass mikroskopisch kleine Computer in die unterschiedlichen Dinge integriert und im täglichen Leben allgegenwärtig sein werden (TA-Swiss-Studie 2004; Haake et al. 2004). Anders als die meisten heutigen informations- und kommunikationstechnischen Produkte werden Komponenten des Pervasive Computing mit Sensoren ausgestattet sein, über die sie ihre Umgebung erfassen, ohne dass der Benutzer dies aktiv veranlasst (Behrendt & Erdmann 2003).

In der Produktion sind zunehmend zu fertigende Teile oder Maschinen autonom. Sie treffen selbstständig Entscheidungen und reduzieren die Komplexität des gesamten Fertigungsprozesses (SFB637 2004). In zukünftigen Embedded Systems sind hierfür die notwendigen Funktionalitäten der Selbststeuerung, wie Kommunikation, Ortung, Rechenleistung und Sensorik enthalten. Dadurch findet eine Zusammenführung von Material- und Informationsfluss am logistischen Objekt statt. Für diese Art der Steuerung wird auch das Vorbild der Natur verwendet, wie im Folgenden am Beispiel der Swarm-Intelligence ausgeführt wird.

Ansätze der Swarm-Intelligence

Der ursprünglich aus dem Tierreich stammende Begriff der Swarm-Intelligence versucht, Techniken und Verfahren aus der Natur anwendbar für die unterschiedlichsten Unternehmensbereiche zu machen. Als Schwarm kann eine Gruppe von Individuen bezeichnet werden, die direkt oder indirekt in der Lage sind, miteinander zu kommunizieren. So lösen Ameisen das Problem des kürzesten Weges zu einer Futterquelle, indem sie eine Spur aus Pheromonen legen, der ihre Artgenossen folgen. Folgt eine Ameise dem kürzesten Weg, so ist sie schneller auf dem Rückweg zum Nest als diejenige, die einen längeren Weg gewählt hat. Da sie ihre Route somit eher doppelt markiert als die anderen, werden die übrigen Ameisen dazu gebracht, dem stärker für sie anziehenden Weg zu folgen. Aus einfachen Regeln folgt ein komplexes Kollektivverhalten. Dieses Verhalten soll durch die Schaffung von Ameisen-Algorithmen nutzbar gemacht werden. Es handelt sich hierbei um naturanaloge Optimierungsverfahren, die bisher vor allem im Bereich der Tourenplanung, Produktionsplanung und bei der Lösung von Schedulingproblemen eingesetzt werden (Merkle et al. 2003, Michels et al. 1999). Zukünftig werden die Forschungsaktivitäten zur Swarm-Intelligence intensiviert und weitere modifizierte Verfahren aus der Natur in Anwendungen überführt.

Digitale Fabrik

Die Digitale Fabrik erlaubt es, komplette Fabriken am Computerbildschirm zu durchschreiten. Diese Möglichkeit nutzen große Konzerne schon lange. Laut einer Studie speziell für kleinere Unternehmen wächst das Interesse auch hier. 55 Prozent der kleinen und mittelständischen Unternehmen planen demnach mindestens viermal im Jahr Produktbereiche neu oder um (Bierschenk 2005). Hier bietet die Digitale Fabrik nennenswerte Vorteile: Am Computer können die Planer ihre Ideen zeit- und kostensparend überprüfen und Alternativen ausprobieren, bevor diese nach erfolgreicher Simulation und Analyse Realität werden. Die digitale Welt wird ihrerseits 2020 Realität sein, das heißt nahezu alle Unternehmen nutzen dann die Digitale Fabrik, um integrierte Produkt- und Prozessplanungen digital zu gestalten und virtuell abzusichern.

Wissensbasiertes Produzieren

Das digitale Produzieren bildet die gesamte Prozesskette durchgehend in einer digitalen Repräsentation ab, deren Basis aktuelle und umfassende Daten sind. Um diese Daten zu liefern und um den steigenden Anforderungen an die Produkte und Prozesse begegnen zu können, gewinnt die Erfassung und Weiterverarbeitung von Informationen sowohl aus unternehmensinternen als auch -externen Bereichen zunehmend an Bedeutung. Sie bildet die Grundlage für die Generierung und Umsetzung von Wissen in qualitativ hochwertige Produkte. Gerade diejenigen Unternehmen, die in der Lage sind, ihre Wissenspotenziale zu identifizieren und wirtschaftlich zwischen ihren Organisationseinheiten weiterzugeben, können auf diese Weise Wettbewerbsvorteile generieren. Das Wissensmanagement versucht, Wissen in Organisationen möglichst wirkungsvoll einzusetzen und zu verteilen und stellt damit einen der wichtigsten Erfolgsfaktoren für heutige Unternehmen und somit eines der zentralen Zukunftsthemen dar (Probst 1997). Das wissensbasierte Produzieren ist für die vernetzte Produktion von besonderer Bedeutung, da hier verschiedene Partner unternehmensübergreifend Wissen austauschen müssen, um erfolgreich im Wettbewerb bestehen zu können.

Vernetzte Produktion

Länderübergreifende Unternehmensnetzwerke werden die Zukunft dominieren. Nicht mehr einzelne Unternehmen oder Konzerne konkurrieren miteinander, sondern solche internationalen Netzwerke. Produzieren in Netzwerken stellt laut Hans-Jörg Bullinger (Bullinger 2005) einen Megatrend der Industrie dar. Unternehmen schließen sich zusammen, um ihre individuellen Stärken zu bündeln. Die Anforderungen einer globalen Präsenz bei hoher logistischer Leistungsfähigkeit können nur durch engere Kooperationen bewältigt werden. Im Gegensatz zum herkömmlichen Lieferketten-Konzept kommunizieren in einem Produktionsnetzwerk auch die Lieferanten untereinander. Die Grenzen zwischen Abnehmer und Erzeuger sind fließend. Themen wie Standortbewertung, Methoden der Netzwerkplanung und -steuerung, Informationsaustausch sowie Schaffung von Transparenz bei gleichzeitigem Vertrauen werden die Zukunft dominieren (Lutz 2002).

Zusammenfassung und Ausblick

Individualisierte und miniaturisierte Produkte werden den Markt weltweit vernetzter Geschäftsprozesse mit vorwiegend älteren Kunden im Jahr 2020 beherrschen. Die Treiber zukünftiger Entwicklungen wie zum Beispiel neue Informations- und Kommunikationstechnologien, Digitalisierung und neue Werkstoffe führen dazu, dass neue Technologien und Fertigungsverfahren entwickelt werden, um solche Produkte zu fertigen. Neben Technologien der Zukunft, wie das Laserstrahlbearbeitungsverfahren, werden noch bisher unbekannte Technologien im Jahr 2020 (zum Beispiel auf Basis von biologischen und chemischen Funktionsträgern) hinzukommen (Zäh 2003). Maschinenkonzepte im Jahr 2020 werden re-konfigurierbar, skalierbar und flexibel in unterschiedlichen Bereichen der Fertigung einzusetzen sein. Ganze Fabriken werden wandlungsfähig gestaltet, sodass den kürzer werdenden Produktlebenszyklen Rechnung getragen wird. Selbststeuerung stellt dabei seitens der Steuerung der Auftragsabwicklung durch die Produktion ein Erfolg versprechendes Steuerungsverfahren der Zukunft dar. Die einzelnen Teile in der Fertigung werden durch neue Identifikations-Technologien und Entscheidungsmethoden intelligent und finden so ihren selbst optimierten Weg durch die Fertigung.

Zur Einschätzung der Marktchancen einer neuen Technologie in der Zukunft wird jedoch ein klares Bild über die Nachfrage-Interessen benötigt. Hieraus entscheidet sich, ob ein Massenmarkt erschlossen werden kann, oder ob es divergierende Interessen zwischen Produzenten und Konsumenten gibt. Dabei müssen vor allem mögliche Ängste der potenziellen Konsumenten vor neuen Produkten und Technologien ernst genommen werden (Scheppach 2001). Ein intensiver Interessendiskurs mit den Endverbrauchern ist notwendig, um im Vorfeld ein mögliches Scheitern neuer Technologien zu verhindern. Darüber hinaus wird die Beantwortung ökologischer und ethischer Fragestellungen in Bezug auf die Technologie entscheidend ihre Zukunft mitbestimmen.

Nach Horx und Scheppach (Scheppach 2001) gibt es derzeit keine einzelne „Breakthrough“-Technologie mehr, auf die sich der technische Fortschritt manifestiert, sondern vielmehr Techno-Cluster – Bündelungen von Techno-

logien. Diese bilden Synthesen und Kombi-Technologien, die sich gegenseitig befruchten. Zukünftige Anforderungen an Entwickler, Wissenschaftler und Technikvermarkter der Zukunft zielen daher in einem höheren Maße auf Universalisten und Kombiniierer ab. Es wird darüber hinaus wesentlich darauf ankommen, wie neue Technologien in Prozessketten logistikkerecht integriert werden. Eine neue Technologie hat nur dann eine Chance in der Zukunft, wenn der Prozess zur Herstellung eines Produktes insgesamt verbessert wird und nicht nur lokale Optimierungen vorgenommen werden. So kann das Potenzial im Zusammenwirken der hier beschriebenen Innovationsfelder dazu führen, dass das Szenario Produktionstechnologie 2020 nicht nur eine Vision bleibt.

Danksagung

Dank gilt den Leitern und Mitarbeitern der Fachgebiete des Fachbereiches Produktionstechnik an der Universität Bremen für die Bereitstellung von Publikationen über aktuelle und zukünftige Entwicklungen in den jeweiligen Forschungsbereichen.

Literatur

- Akademischer Verein Hütte e.V.: Das Ingenieurwesen. Berlin 2002
- Behrendt, S./Erdmann, L.: Nachhaltigkeit und Vorsorge – Anforderungen der Digitalisierung an das politische System. Aus Politik und Zeitgeschichte. In: Das Parlament 42, 2003, S. 13-20
- Bierschenk, S./Fisser, F./Kuhlmann, T./Ritter, A.: Stand der Digitalen Fabrik bei kleinen und mittelständischen Unternehmen – Auswertung der Breitenbefragung. Fraunhofer IPA. Stuttgart 2005
- Blomeyer-Bartenstein, H.-P./Both, R.: Datenkommunikation und lokale Computer-Netzwerke. Grundlagen und Einsatz der Telematik. Pearson Education. München 1985
- Blüchel, K.G.: Bionik. Bertelsmann. München 2005
- Bohnet, C.: Materialien magnetisch strukturiert. In: Applied Physics Letters 86, 162502. New York 2005
- Bonabeau, E./Theraulaz, G.: Swarm Smarts. In: Scientific American. March 2000
- Bonabeau, E./Meyer, C.: Schwarm-Intelligenz: Unternehmen lernen von Bienen und Ameisen. In: Harvard Business Manager 6. 2001, S. 38-49
- Bonabeau, E./Meyer C.: Swarm Intelligence: A Whole New Way to Think About Business. In: Harvard Business Review, May 2001, S. 107-114
- Brinksmeier, E./Meyer, L.: Forschungsansätze zur Weiterentwicklung der Schleiftechnik. IWT. Bremen 2004
- Brungs, D./Fuchs, H.: Leichtmetall im Automobilbau – Trends und zukünftige Anwendungen. In: ATZ/MTZ-Sonderausgabe: Werkstoffe im Automobilbau. 1998/1999, S. 50-53
- Bullinger, H.-J.: Produzieren in Netzwerken. In: ZWF Sonderpublikation Digitale Fabrik. Carl Hanser Verlag. München 2005, S. 6
- Bundesministerium für Bildung und Forschung: Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“. Bonn 1999
- Busse, M./Stöbener, K.: Advanced Pore Morphology (APM) in Industrie Management, 6/2004. Berlin 2004, S. 39-42
- Christaller, T.: Robotik. Springer. Berlin 2001
- Clausen, U.: Informations- und Kommunikationssysteme in der Verkehrslogistik I. Universität Dortmund 2002

- Dambacher, G. T.: Selbstreinigende Oberflächen nach Blumenart. In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Trendbarometer Technik. Hanser Verlag, München 2003, S. 116-117
- Dilthey, U.: Laserstrahlschweißen. DVS-Verlag, Düsseldorf 2000
- European Commission: MANUFUTURE – a vision for 2020; Assuring the future of manufacturing in Europe. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 2004
- European Commission: Manufuture; A Vision for 2020. Report of the high-level group. Belgium 2004.
- Evers, H./Kasties, G.: Kompendium der Verkehrstelematik. TÜV-Verlag, Köln 1999
- Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch. Hanser Fachbuchverlag, München 2002
- Fleischmann, B: Begriffe der Logistik, logistische Systeme und Prozesse. In: Kuhn, A. et. al. (Hrsg.): Handbuch Logistik. VDI-Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2002
- Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM): Funktionalisierung durch Mikro- und Nanotechnologien. In Jahresbericht 2004. Bremen, Dresden 2004, S. 76-83
- Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik: Minutes – Manufuture 2004 Workshop. 1st, July 2004 Dortmund
- Friedrich, A. Th.: Der Brain drain aus Europa in die USA wächst. In: Die Welt. Im Internet unter: <http://www.welt.de/data/2005/07/20/748011.html>
- Goche, P./ Kaufmann, M./Metz, Ch.: Einbindung der Innenhochdruck-Verfahren in die Normenreihe DIN 8580 ff. Beuth. 2005
- Grathwohl, G.: Von Biokeramiken und Nanocomposites – Neue Herausforderungen der technischen Keramik. In: Neue Keramik: Aufbruch in Biosphäre und Nanowelt. Wolfgang-Ritter-Stiftung, Universität Bremen, Universitätsverlag Aschenbeck & Isensee. Bremen, Oldenburg 2004, S. 8-31
- Haake, J./Schwabe, G./Wessner, M.: CSCL-Kompendium. Oldenbourg Verlag, München, Wien 2004
- Harig, H./Langenbach, J.C. (Hrsg.): Neue Materialien für innovative Produkte – Entwicklungstrends und gesellschaftliche Relevanz. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1999

- Heimann, B./Gerth, W./Popp, K.: Mechatronik. Fachbuchverlag. Leipzig 2001
- Hennemann, O.-D./Kim, S. J.-M.: Rechnergestützte Methoden der Klebtechnik. In: Industrie Management, Heft 6, Berlin 2004, S. 27-30
- Hirt, G./Ames, J.: Inkrementelles Blechumformen mit CNC-Werkzeugmaschinen. In: Industrie Management, Heft 6, Berlin 2004, S.15-18
- Horváth, P., Controlling. Verlag Vahlen. München 2002
- Klaus, P.: Gabler-Lexikon Logistik. Gabler Verlag. Wiesbaden 1998, S. 434-441 und 379
- Klocke, F./König, W.: Fertigungsverfahren 5 Urformtechnik, Gießen, Sintern, Rapid Prototyping. Springer. Heidelberg 2005
- Kuhfuß, B.: Recent Development and Manufacture of Machine Tools in Germany; Key-note paper; 11th International Machine Tool Engineers Conference (IMEC' 04), 01. – 08. November 2004, Tokyo Japan
- Kuhfuß, B./Schenck, C.: Estimated Process Time Savings by PKM and HKM Machining. 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar; Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics. Tagungsband. Chemnitz 20-21 April 2004, S. 277-290
- Kutschker, M./Schmid, S.: Internationales Management. Oldenbourg Verlag. München, Wien 2005
- Lauritz, L.: Interaktion zwischen Mensch und Computer im Ubiquitous Computing. Lit Verlag. Münster et al. 2004
- Lutz, S./Cierninski, v. G./Wiendahl, H.-P.: Produzieren in Netzwerken – eine Frage des Vertrauens. In: phi 4/2002, S. 4-5
- Mattern, F.: Total vernetzt. Springer-Verlag. Berlin 2003
- Merkle, D./Middendorf, M.: Swarm Intelligence. In: Burke, E./Kendall, G. (Hrsg.): Introductory Tutorials in Optimisation, Search and Decision Support Methodology. Kluwer. 2003
- Michels, R./Middendorf, M.: An Ant System for the Shortest Common Supersequence Problem. In: Corne, D./Dorigo, M./Glover, F. (Hrsg.): New Ideas in Optimization. London 1999
- Montresor, A./Babaoglu, O.: The BISON Project, IEEE Computational Intelligence Bulletin. Dec. 2002, Vol. 1, No.1
- Moore, G.E.: Cramming more components onto integrated circuits. In: Magazine Electronics 38 (8/1965). 1965, S. 114-117
- Nachtigal, W.: Bionik. Springer. Berlin 2002

- Niesig, B.: Leicht, leichter, Magnesium. In: Fraunhofer Magazin 04.2004, S. 38-40. Im Internet unter: http://www.fraunhofer.de/fhg/Images/4.2004-38_tcm5-12194.pdf
- Nyhuis, P./Mühlenbruch, H./Heins, M.: Altersgerechte Qualifizierung – lebendige Qualifizierung mit dem Production Trainee. In: wt Werkstatttechnik online; 94. Jg, Heft 9. 2004. Springer VDI Verlag GmbH & Co. KG. Düsseldorf 2004
- Probst, G. et al.: Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. Gabler. Wiesbaden 1997
- Prognos/Eitenmüller, S.: Prognos Deutschland Report 2002-2020. Basel 2002
- Proprawe, R./Otto, A.: Strategy Paper – Photonics for the Benefit of Europe. Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik e.V., Erlangen 2004
- Raebiger, N./Gildemeister R./Haase C./Moormann, H./Wohlers, J.: Umweltorientierte Bewertung von Produktionsprozessen am Beispiel der Verbundinitiative BIOL, Biokatalyse Sonderband 2003, S. 126-129
- Raebiger, N.: Wasser- und Abwassertechnik: Entwicklungen und Meilensteine. In: Chemieingenieur Technik, Band 75, Heft 10. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim 2003, S. 1523-1526
- Roos, H.-J.: Einsatz standardisierter Datenträger für den warenbegleitenden Informationsfluss in der deutschen Möbelfertigung, Abschlussbericht AIF, Nr. 12765 N. Stuttgart 2003
- Scharioth, J./Huber, M./Schulz, K./Pallas, M.: Horizons 2020. Ein Szenario als Denkanstoß für die Zukunft. TNS Infratest Wirtschaftsforschung. Siemens AG. München Oktober 2004
- Scheppach, J.: HighTech 2010, Die 15 wichtigsten Technologie-Märkte der Zukunft: Welche Anwendungen setzen sich durch – und welche werden ein Flop? Studie. Zukunftsinstitut M. Horx. Frankfurt 2001
- Scholz-Reiter, B./Windt, K.; Freitag, M.: Autonomous Logistic Processes – New Demands and First Approaches; Proceedings of 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, May 19-21, 2004, Budapest, Hungary
- Schreiber, G.A.: Telemetrie und Telematik in der Logistik. Deutscher Wirtschaftsdienst. 2003
- Semrau, H.: Laserschneiden. Moderne Industrie. Landsberg 1990

- SFB 637 Universität Bremen: Selbststeuerung logistischer Prozesse – ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. Technical Report. Preprint. 2004. Im Internet unter: www.sfb637.uni-bremen.de
- Shepard: S.: RFID Radio Frequency Identification. McGraw-Hill Professional Publishing 2004
- TA-Swiss-Studie 2004: Unser Alltag im Netz der schlauen Gegenstände. Kurzfassung der TA-SWISS Studie „Das Vorsorgeprinzip in der Informationsgesellschaft – Auswirkungen des Pervasive Computing auf Gesundheit und Umwelt“. Im Internet unter http://www.ta-swiss.ch/www-remain/reports_archive/publications/2003/TA_46A_2003_deutsch.pdf
- VDMA: Feller, C./Krebs, S./Laux, S./Walter, S.: Maschinenbau-Ingenieur. In: Ein Beruf für kreative Köpfe. Frankfurt 2003
- VDMA: Maschinenbau in Zahl und Bild 2004. Frankfurt 2004
- VDW/WGP Industriekreis: Abschlussbericht Werkzeugmaschine 2010 – Voruntersuchung zum Thema Werkzeugmaschine 2010. Karlsruhe 2002
- Venir, F.: Leichtbau stimuliert den Absatz. In: ATZ/MTZ-Sonderausgabe: Werkstoffe im Automobilbau. 1998/1999. S. 54-56
- Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW): Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie im Jahr 2003. Frankfurt am Main 2004
- Wagner, F./Vollertsen, F./Seefeld, T.: Neue Entwicklungen und Trends im Bereich des Laserfügens. In: Industrie Management, 6/2004. Berlin 2004, S. 11-14
- Walter, A.: Trend: Werkstoff bestimmt Fertigungsprozess. In: PRODUKTION Nr. 35, 30.08.2001, S. 24
- Westkämper, E./Warnecke, H.-J.: Einführung in die Fertigungstechnik. Teubner. Wiesbaden, 2004
- Westkämper, E./Jendoubi, L.: Smart Factories – Manufacturing Environments and Systems of the Future. In: Bley, H. (Hrsg.): Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. 2003, S. 13-16
- Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik. Im Internet unter: <http://www.wgp.de>
- Wiendahl, H.-P./Herger, C.L.: Changeability of Factories – A Prerequisite for Global Competitiveness, Proceedings of 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Budapest, Ungarn, 2004, pp. 1-9

- Wöttig, G.: Hochleistungskeramik in der industriellen Praxis und Entwicklung – eine Erfolgsstory? In: Neue Keramik: Aufbruch in Biosphäre und Nanowelt, Wolfgang-Ritter-Stiftung, Universität Bremen. Universitätsverlag Aschenbeck & Isensee, Bremen, Oldenburg, 2004, S. 32-56
- Zäh, M./Reinhart, G. (Hrsg.): Virtuelle Produktionssystem-Planung: Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik. Herbert Utz Verlag Wissenschaft. München 2004
- Zäh, M./Hoffmann, H./Anton, O./Baudisch, T./Semmler, S.: Megatrends der Produktionstechnik – Herausforderungen für Gesellschaft, Wissenschaft und Ausbildung. Beitrag auf dem Münchener Kolloquium 2003: Grenzen überwinden – Wachstum der neuen Art. München 27.-28.02.2003