



Bibliothek des technischen Wissens

Burkhard Heine  
Dietmar Schmid  
Michael Dambacher  
Fabian Holzwarth  
Friedrich Klein

Wolfgang Schäfer  
Geert Schellenberg  
Manfred Behmel  
Matthäus Kaufmann  
Uwe Berger

Peter Strobel  
Karl Schekulin  
Eckehard Kalhöfer  
Rolf Roller

# Industrielle Fertigung

Fertigungsverfahren, Mess- und Prüftechnik

8., neubearbeitete Auflage, mit CD

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsseldorfer Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

**Europa-Nr.: 53510**

**Die Autoren des Buches:**

**Burkhard Heine**, Dr. rer. nat., Prof., Aalen: *Endkonturnahe Formgebung, Spanloses Trennen, Bauteile aus Keramik, Bauteile aus Silikatglas, Fügen, Oberflächenmodifikation, Werkstoffprüfung, Werkstoffkunde.*

**Dietmar Schmid**, Dr.-Ing., Prof., Essingen: *Einführung, Mech. Zerteilen, Sägemaschinen, Montage, Robotik, Bildverarbeitung, Qualifizierung von Robotern, div. Einzelbeiträge.*

**Michael Dambacher**, Studiendirektor, Aalen: *Zerspantechnik.*

**Fabian Holzwarth**, Dr.-Ing., Prof., Adelmannsfelden: *Fertigungsmesstechnik.*

**Friedrich Klein**, Dr.rer. nat., Prof., Aalen: *Gießereitechnik.*

**Wolfgang Schäfer**, Dr. rer. nat., Bermatingen: *Kunststoffe und Faserverstärkte Kunststoffe.*

**Geert Schellenberg**, Dr.-Ing., Stuttgart: *Werkstoffprüfung, Bauteilprüfung.*

**Manfred Behmel**, Studienrat, Aalen: *Pulvermetallurgie, Umformtechnik, Wärmebehandlung von Stahl.*

**Matthäus Kaufmann**, Dipl.-Ing., Aalen: *Werkzeugmaschinen.*

**Uwe Berger**, Dr.-Ing., Prof., Aalen: *Additive Fertigung.*

**Peter Strobel**, Dipl.-Ing., Aalen: *Koordinatenmessgeräte.*

**Karl Schekulin**, Dipl.-Ing., Prof., Reutlingen: *Funkenerosion, Elektrochemisches Abtragen.*

**Eckehard Kalhöfer**, Dr.-Ing., Prof., Aalen: *Qualifizierung von NC-Maschinen.*

**Rolf Roller**, Oberstudienrat, Herbrechtingen: *Formtechnik.*

**Lektorat und Leitung des Arbeitskreises:** Dietmar Schmid, Prof. Dr.-Ing., Essingen

**Bildbearbeitung:** Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

Dem Buch wurden die neuesten Ausgaben der Normen und Gesetze zu Grunde gelegt. Verbindlich sind jedoch nur die Normblätter selbst und die amtlichen Gesetzestexte. Wie in Lehrbüchern üblich werden etwa bestehende Patente, Gebrauchsmuster oder Warenzeichen meist nicht erwähnt. Das Fehlen eines solchen Hinweises bedeutet daher nicht, dass die dargestellten Produkte frei davon sind. Daten und Darstellungen, die sich auf Herstellerangaben beziehen, sind gewissenhaft recherchiert. Sie sind aber mit keiner Gewährleistung irgendwelcher Art verbunden und können sich durch weiteren Fortschritt auch verändert haben. Der Verlag und die Autoren übernehmen daher keine Verantwortung oder Haftung aus der Nutzung von Daten oder Darstellungen dieses Buches. Die Bilder sind von den Autoren entworfen oder entstammen aus deren Arbeitsumfeld. Soweit Bilder, insbesondere Fotos, einem Copyright Dritter unterliegen, sind diese mit dem ©-Symbol und dem Urhebername versehen.

8. Auflage 2019

Druck 5 4 3 2 1: Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-5366-4

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2019 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG., 42781 Haan-Gruiten  
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: PER MEDIEN & MARKETING GmbH, 38102 Braunschweig

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald, unter Verwendung eines Pressefotos der Siemens AG.

Druck: Lensing Druck GmbH & Co. KG, 44149 Dortmund, [www.lensingdruck.de](http://www.lensingdruck.de)

## Vorwort zur 8. Auflage

Die industrielle Fertigung, jetzt mit der **4. industriellen Revolution**, ist der Träger unseres Wohlstandes. Sie ermöglicht die hohe Verfügbarkeit der täglichen Gebrauchsgüter. Es war die 2. industrielle Revolution mit der Massenproduktion, die große Teile der Menschheit von Hunger und Not befreite und andere Kulturgüter, wie z. B. die Medizin und das Verkehrs- und Kommunikationswesen, erst ermöglicht hat.

Die industrielle Fertigung hat in ihrem Kern den Bereich der *industriellen Fertigungsverfahren*. Zur erfolgreichen Umsetzung der industriellen Fertigung gehört zwingend die Sicherung der Qualität und somit die *Mess- und Prüftechnik*.

### Die wichtigsten Segmente der industriellen Fertigung sind:

- Fertigen mit Metallen,
- Fertigen mit Kunststoffen, Faserverstärkten Kunststoffen (FVK), Keramiken und Glas,
- Fügen der Bauteile und
- Behandeln der Oberflächen.

### Die wichtigsten Felder der Mess- und Prüftechnik sind:

- Fertigungsmesstechnik, Geometrische Produktspezifikation (GPS),
- Werkstoffprüfung,
- Ermittlung des Bauteilverhaltens und
- Qualifizierung der Fertigungsmittel.

Aufgrund der Dominanz des Metallsektors innerhalb der industriellen Fertigung ist diesem Bereich der größte Teil des Buches gewidmet. Er wird in Anlehnung an DIN 8580 in der Reihenfolge Urformen (Gießen), Umformen, Trennen (Zerspanen) behandelt, wobei die Zerspantechnik besonders ausführlich dargestellt ist. Damit wird ihrer Schlüsselfunktion in unserer Industriegesellschaft Rechnung getragen.

Dieses Buch vermittelt den Lehrstoff, wie er im Bereich der Fertigungstechnik in *Fachschulen für Technik* und in ingenieurwissenschaftlichen *Hochschulen* gefordert wird, aber auch wie er notwendig ist im Bereich der beruflichen *Weiterbildung*. In allen Kapiteln wird nicht nur das jeweilige Faktenwissen dargestellt und mit sehr vielen Zeichnungen und Fotos leicht verständlich und gleichsam einprägsam gemacht, sondern es werden stets auch die Zusammenhänge zum gesamtproduktionstechnischen Rahmen aufgezeigt, seien es Hinweise auf alternative Verfahren, seien es günstige Gestaltungsaspekte der Bauteile oder seien es Umweltgesichtspunkte. Damit wird das Buch der Aufgabe eines Lehrbuches gerecht. Es soll den Leser anregen zum Querdenken und zu kreativem Handeln und ihn zum verantwortungsbewussten Einordnen und Bewerten der Fertigungsmethoden befähigen.

Die *Werkstoffe*, ihre Eigenschaften und ihr Verhalten bestimmen wesentlich die Fertigungsverfahren und werden dementsprechend an vielen Stellen angesprochen. Kenntnisse zur Werkstoffkunde werden vorausgesetzt. Um dem Leser eine zusätzliche Hilfe an die Hand zu geben, ist dem Buch eine „Kleine Werkstoffkunde für Metalle“ hinzugefügt.

*Im Sinne der Allgemeinbildung ist bei den wichtigsten Techniken auf ihre historischen Ursprünge in der Menschheitsgeschichte Bezug genommen. Sind es doch die Fertigungsverfahren mit den zugehörigen Werkstoffen und Werkzeugen, die unsere Kulturgeschichte von der Steinzeit über die Bronze- und Eisenzeit bis hin zum Industriezeitalter geprägt haben. Nur so lässt sich der heutige Stand der Technik wirklich verstehen und in seinen Werten einordnen.*

In der **8. Auflage** gibt es Aktualisierungen und Neubearbeitungen in allen Teilgebieten. Besonders hervorzuheben sind die Neugestaltung der Zerspanungstechnik und der **Kunststofftechnik** sowie die neuen Kapitel zu **Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)**, **Geometrische Produktspezifikation (GPS)**, **Strahltechnik** und **Entgraten**.

Das umfangreiche farbige und einmalige Bildmaterial wird den Nutzern des Buches auf einer CD in hoher Auflösung zur Verfügung gestellt. Die CD enthält auch ein **Repetitorium** und zwar sowohl abschnittsweise eingebettet in die Bildfolge als auch zusammenhängend aufrufbar. So dient dieses einerseits dem schrittweisen Studieren und andererseits der Selbstprüfung ganzer Wissensgebiete. Hinzu befinden sich auf der CD **wichtige Gesetze und Vorschriften**.

Hinweise und Verbesserungsvorschläge können dem Verlag und damit den Autoren unter der E-Mail-Adresse [lektorat@europa-lehrmittel.de](mailto:lektorat@europa-lehrmittel.de) gerne mitgeteilt werden.

# Inhaltsverzeichnis

## Fertigungsverfahren

<b>1</b>	<b>Einführung in die industrielle Fertigungstechnik</b>	<b>9</b>			
1.1	Fertigungstechnik als eine Triebfeder der Menschheit	9	2.1.8.3	Die Längenausdehnung	81
1.2	Die Fertigungsverfahren im Überblick	11	2.1.8.4	Eigenschaftsänderungen beim Übergang flüssig – fest	81
1.3	Entwicklungsphasen der industriellen Technik	14	2.1.8.5	Dichte bei Legierungen	81
1.4	Industrie 4.0	16	2.1.8.6	Aufteilen des Volumendefizits	82
1.5	Aktuelle Ziele und Entwicklungen	18	2.1.8.7	Entstehen eines Innendefizits	82
1.5.1	Werkzeugmaschinen	18	2.1.8.8	Entstehen von Luft- und Gaseinschlüssen bei der Formfüllung	84
1.5.2	Fertigungsverfahren	20	2.1.8.9	Entstehen von Spannungen und Rissen	86
1.5.3	Leichtbau	22	2.1.8.10	Schwindung der Gussteile in festem Zustand	87
1.5.4	Energieeffizienz und Ressourceneffizienz	23	2.1.8.11	Thermische Eigenschaften der Gießwerkstoffe	89
1.6	Geschwindigkeit und Qualität	24	2.1.9	Wärmeabfuhr an Formen	92
1.7	Management	26	2.1.9.1	Wärmeübergang von der Schmelze zur Form	92
1.7.1	Produktdatenmanagement (PDM)	26	2.1.9.2	Wärmebilanz einer Form	92
1.7.2	ERP	26	2.1.9.3	Wärmedurchgangszahl	93
1.7.3	Manufacturing-Execution-Systeme – MES	27	2.1.9.4	Schichten	94
1.7.4	Supply Chain Management (SCM)	28	2.1.9.5	Abkühlkurven für Gussteile	94
			2.1.9.6	Kontakttemperatur in der Grenzfläche von Schmelze/Gussteil zur Form	95
<b>2</b>	<b>Fertigen mit Metallen</b>	<b>29</b>	2.1.9.7	Wärmefluss im System Schmelze/Gussteil zur Form	96
2.1	Gießereitechnik	29	2.1.9.8	Wärmeleitung in einem Körper und Bildung der Randschale	96
2.1.1	Gegossene Bauteile	29	2.1.9.9	Ermittlung der Erstarrungszeit	97
2.1.2	Geschichtliche Entwicklung	32	2.1.9.10	Der Erstarrungsmodul	98
2.1.3	Begriffe, Bezeichnungen	38	2.1.10	Speisertechnik	99
2.1.3.1	Unterscheidung nach Werkstoffen	38	2.1.10.1	Art der Speiser	99
2.1.3.2	Unterscheidung nach mechanischen Eigenschaften	38	2.1.10.2	Position und Geometrie der Speiser	100
2.1.3.3	Unterscheidung nach Gießverfahren	39	2.1.10.3	Formstoff zum Abformen der Speiser	100
2.1.3.4	Art der Formfüllung	40	2.1.10.4	Anforderungen an Speiser	102
2.1.3.5	Art des Vergießens	41	2.1.10.5	Metallostatischer Druck	103
2.1.3.6	Sonstige Unterscheidungsmerkmale	41	2.1.10.6	Abtrennen der Speiser	104
2.1.4	Gusswerkstoffe	42	2.1.10.7	Abhängigkeit des Speisungsvolumens von thermischen Verhältnissen	105
2.1.5	Gießverfahren	46	2.1.10.8	Belüftung innenliegender Speiser	105
2.1.5.1	Sandgießverfahren	46	2.1.11	Formfüllvorgänge	106
2.1.5.2	Schwerkraftkokillengießen	48	2.1.12	Strömungsvorgänge der Schmelze	109
2.1.5.3	Niederdruckkokillengießen	49	2.1.12.1	Schwerkraftgießen	109
2.1.5.4	Schleudergießen	49	2.1.12.2	Druckgießen	110
2.1.5.5	Feingießen	50	2.1.12.3	Schleudergießen	110
2.1.5.6	Druckgießen	51	2.1.12.4	Aufbau eines Gießsystems	110
2.1.5.7	Weitere Gießverfahren	55	2.1.12.5	Staufüllung und Strahlfüllung	113
2.1.5.8	Vergleich der Gießverfahren	56	2.1.13	Simulation der Formfüllung	114
2.1.6	Formtechnik	58	<b>2.2</b>	<b>Pulvermetallurgie (PM)</b>	<b>115</b>
2.1.6.1	Übersicht	58	2.2.1	Metallpulver	116
2.1.6.2	Grundlagen	59	2.2.2	Die Herstellung pulvermetallurgischer Werkstücke	117
2.1.6.3	Modellarten	61	2.2.2.1	Aufbereiten der Metallpulver	117
2.1.6.4	Handformen	62	2.2.2.2	Pressen der Grünlinge	118
2.1.6.5	Maschinenformen	64	2.2.2.3	Sintern	120
2.1.6.6	Formanlagen	67	2.2.2.4	Nachbehandlung	122
2.1.6.7	Kerne	68	2.2.3	Pulverspritzgießen	123
2.1.6.8	Direkte Herstellung von Formen und Kernen	70	2.2.4	Sinterwerkstoffe und Sinterwerkstücke	124
2.1.6.9	Formstoffe	71	2.2.5	Gestaltung	124
2.1.7	Anforderungen an Gussteile und Fertigungsbedingungen	72	<b>2.3</b>	<b>Galvanische Verfahren</b>	<b>125</b>
2.1.7.1	Einleitung	72	2.3.1	Galvanoformung	125
2.1.7.2	Vollständigkeit	72	2.3.2	Lithographie-Galvanik-Abformung (LIGA)	125
2.1.7.3	Vermeiden von Kaltfließstellen	73	<b>2.4</b>	<b>Umformtechnik</b>	<b>126</b>
2.1.7.4	Vermeiden innerer Hohlräume	74	2.4.1	Übersicht	126
2.1.7.5	Maßhaltigkeit	75	2.4.2	Geschichtliche Entwicklung	128
2.1.7.6	Maßbeständigkeit	76	2.4.3	Metallkundliche Grundlagen	129
2.1.7.7	Korrosionsfestigkeit	77	2.4.4	Druckformen	133
2.1.7.8	Oberflächenbeschaffenheit	77	2.4.4.1	Warmwalzen	133
2.1.8	Eigenschaften metallischer Werkstoffe	78	2.4.4.2	Der Vorgang des Walzens	133
2.1.8.1	Volumeneigenschaften	78	2.4.4.3	Walzverfahren	135
2.1.8.2	Werkstoffkennwerte im Vergleich	80	2.4.4.4	Freiformen, Übersicht	138
			2.4.4.5	Gesenkschmieden	141
			2.4.4.6	Eindrücken	145
			2.4.4.7	Durchdrücken	147

2.4.5	Zugdruckumformen.....	152	2.6.5.3	Tiefbohren.....	249
2.4.5.1	Gleitziehen.....	152	2.6.5.4	Aussteuerwerkzeuge.....	255
2.4.5.2	Tiefziehen.....	154	2.6.6	Reiben und Feinbohren.....	256
2.4.5.3	Drücken.....	156	2.6.7	Fräsen.....	257
2.4.6	Zugumformen.....	157	2.6.7.1	Fräsverfahren.....	257
2.4.6.1	Längen.....	157	2.6.7.2	Schnittgrößen beim Fräsen.....	258
2.4.6.2	Weiten.....	157	2.6.7.3	Besondere Fräsverfahren.....	263
2.4.6.3	Tiefen.....	158	2.6.8	Maschinelle Gewindeherstellung.....	266
2.4.7	Biegen.....	161	2.6.8.1	Allgemeines.....	266
2.4.7.1	Physikalisch-technischer Vorgang.....	161	2.6.8.2	Innengewindefräsen.....	267
2.4.7.2	Biegeverfahren.....	162	2.6.8.3	Gewindedrehfräsen.....	269
2.4.8	Schubumformen.....	164	2.6.8.4	Gewindewirbeln.....	270
2.4.9	Pressmaschinen.....	165	2.6.8.5	Gewindedrehen.....	270
2.4.9.1	Weggebundene Pressmaschinen.....	165	2.6.9	Räumen.....	273
2.4.9.2	Kraftgebundene Pressmaschinen.....	167	2.6.10	Hobeln und Stoßen.....	275
2.4.9.3	Arbeitsgebundene Pressmaschinen.....	168	2.6.11	Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.....	276
2.4.9.4	Servopressen.....	168	2.6.11.1	Übersicht.....	276
<b>2.5</b>	<b>Spanloses Trennen und Abtragen.....</b>	<b>169</b>	2.6.11.2	Technologischer Hintergrund.....	278
2.5.1	Mechanisches Zerteilen.....	169	2.6.11.3	Prozesskette und Komponenten.....	279
2.5.1.1	Scherschneiden.....	169	2.6.11.4	Schnittdaten.....	280
2.5.1.2	Bruchtrennen (Cracken <sup>1)</sup> ).....	171	2.6.11.5	Bearbeitungsstrategie.....	280
2.5.1.3	CNC-Stanzen.....	172	2.6.11.6	Software und Programmierung.....	284
2.5.1.4	Wasserstrahlschneiden.....	173	2.6.11.7	HSC-Werkzeuge.....	285
2.5.1.5	Abtragen und Modifizieren durch Strahlen.....	174	2.6.11.8	Schneidstoffe.....	286
2.5.2	Thermisches Trennen und Abtragen.....	175	2.6.11.9	Werkzeugaufnahme.....	287
2.5.2.1	Trennen mit Brenngas/Sauerstoff-Flamme.....	175	2.6.11.10	Unwucht.....	289
2.5.2.2	Trennen mit Lichtbogen.....	176	2.6.12	Kühlschmierung.....	291
2.5.2.3	Trennen mit Plasma <sup>1</sup> .....	177	2.6.12.1	Kühlschmierstoffe (KSS).....	292
2.5.2.4	Trennen mit Elektronenstrahl.....	177	2.6.12.2	Aufbereitung und Entsorgung.....	295
2.5.2.5	Trennen und Bearbeiten mit Laserstrahl.....	177	2.6.13	Minimalmengenschmierung (MMS).....	296
2.5.3	Abtragen durch Funkenerosion.....	178	2.6.14	Trockenbearbeitung.....	298
2.5.4	Elektrochemisches Abtragen (ECM).....	184	2.6.15	Schleifen.....	300
2.5.5	Ultraschallerosion.....	188	2.6.15.1	Schleifverfahren.....	300
<b>2.6</b>	<b>Zerspanungstechnik.....</b>	<b>189</b>	2.6.15.2	Schleifprozess.....	301
2.6.1	Einführung.....	189	2.6.15.3	Schleifkorn.....	302
2.6.1.1	Spanbildung.....	192	2.6.15.4	Schleifmittel.....	303
2.6.1.2	Zerspanungskräfte.....	195	2.6.15.5	Schleifkorngröße (Schleifmittelkörnung).....	305
2.6.1.3	Zerspanungsleistung.....	197	2.6.15.6	Schleifmittelbindung.....	306
2.6.1.4	Werkzeugverschleiß.....	198	2.6.15.7	Härte und Gefüge.....	307
2.6.1.5	Standzeit.....	201	2.6.15.8	Schleiftechnisches Grundprinzip.....	308
2.6.2	Schneidstoffe.....	206	2.6.15.9	Schnittwerte beim Schleifen.....	309
2.6.2.1	Übersicht.....	206	2.6.15.10	Schnittkraft und Schnittleistung beim Schleifen.....	310
2.6.2.2	Schneidstoffeigenschaften.....	207	2.6.15.11	Abrichten von Schleifkörpern.....	311
2.6.2.3	Schnellarbeitsstähle.....	208	2.6.16	Läppen.....	312
2.6.2.4	Hartmetalle.....	210	2.6.17	Honen.....	313
2.6.2.5	Cermets.....	211	2.6.18	Entgraten.....	314
2.6.2.6	Keramische Schneidstoffe und Diamant.....	212	2.6.18.1	Allgemeines.....	314
2.6.2.7	Auswahlkriterien.....	216	2.6.18.2	Entgratverfahren.....	315
2.6.2.8	Klassifizierung der Schneidstoffe.....	218	2.6.19	Werkzeugmaschinen.....	316
2.6.3	Zerspanbarkeit.....	221	2.6.19.1	Fräsmaschinen.....	316
2.6.3.1	Technologische Beschreibung.....	221	2.6.19.2	Drehmaschinen.....	336
2.6.3.2	Zerspanbarkeit der Stahlwerkstoffe.....	221	2.6.19.3	Schleifmaschinen.....	340
2.6.3.3	Legierter Stahl.....	222	2.6.19.4	Sägemaschinen.....	343
2.6.3.4	Nichtrostende Stähle.....	223	2.6.20	Werkstückspanntechnik.....	344
2.6.3.5	Gusseisenwerkstoffe.....	224	2.6.20.1	Mechanische Spannsysteme.....	345
2.6.3.6	Schwer zerspanbare Werkstoffe.....	225	2.6.20.2	Hydraulische und pneumatische Spann- systeme.....	346
2.6.3.7	Graphit.....	225	2.6.20.3	Vakuum-Spannsysteme.....	347
2.6.3.8	Aluminium-Legierungen.....	226	2.6.20.4	Magnetspanntechnik.....	349
2.6.3.9	Kunststoffe.....	227	2.6.20.5	Gefrierspanntechnik.....	349
2.6.3.10	Verbundwerkstoffe (Composites).....	227	<b>2.7</b>	<b>Wärmebehandlung von Stahl.....</b>	<b>350</b>
2.6.3.10	Bearbeitung harter Eisenwerkstoffe.....	228	2.7.1	Durchhärten.....	350
2.6.4	Drehen.....	230	2.7.2	Oberflächenhärten.....	353
2.6.4.1	Allgemeines.....	230	2.7.2.1	Oberflächenhärten durch Wärmebehandlung.....	353
2.6.4.2	Schnittgrößen beim Drehen.....	231	2.7.2.2	Härten durch chemische Veränderung der Randschicht.....	354
2.6.4.3	Innenausdrehen.....	236	2.7.3	Glühen von Stählen.....	356
2.6.4.4	Abstech- und Einstechdrehen.....	238			
2.6.4.5	Besondere Drehverfahren.....	240			
2.6.5	Bohren.....	241			
2.6.5.1	Bohrvorgang und Eigenschaften.....	241			
2.6.5.2	Bohrwerkzeuge.....	247			

<b>3 Fertigung mit Nichtmetallen</b>	<b>357</b>	4.1.3	Schweißen polymerer Werkstoffe	472
<b>3.1 Produkte aus Kunststoffen</b>	<b>357</b>	4.1.4	Löten	474
3.1.1 Kunststoffe	357	4.1.4.1	Werkstoffkundliche Aspekte I	475
3.1.1.1 Einteilung und Arten	357	4.1.4.2	Lötprozess	478
3.1.1.2 Bauteilgestaltung	363	4.1.4.3	Werkstoffkundliche Aspekte II	478
3.1.2 Fertigungsverfahren	364	4.1.5	Kleben	480
3.1.2.1 Extrudieren <sup>1</sup>	365	4.1.5.1	Werkstoffkundliche Aspekte	481
3.1.2.2 Folienblasen	367	4.1.5.2	Bindemechanismen innerhalb der Klebstoffschicht	482
3.1.2.3 Kalandrieren	368	<b>4.2 Oberflächenmodifikation von Bauteilen</b>	<b>485</b>	
3.1.2.4 Spritzgießen	369	4.2.1 Vorbehandlung	485	
3.1.2.5 Varianten des Spritzgießens	375	4.2.1.1 Entfernen von Belägen	486	
3.1.2.6 Simulation des Spritzgießprozesses	377	4.2.1.2 Aktivierung von Oberflächen	488	
3.1.2.7 Hohlkörperblasen (Blasformen)	380	4.2.1.3 Glätten von Oberflächen	489	
3.1.2.8 Schäumen	381	4.2.1.4 Eigenspannungen	489	
3.1.2.9 Thermoformen	382	4.2.1.5 Aufrauen von Oberflächen	490	
<b>3.2 Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)</b>	<b>383</b>	4.2.2 Oberflächenmodifikation	491	
3.2.1 Einteilung und Arten	384	4.2.2.1 Modifikation durch Diffusion	492	
3.2.2 Bauteilgestaltung	386	4.2.2.2 Modifikation unter Verwendung eines flüssigen Elektrolyten	493	
3.2.3 FVK-Fertigungsverfahren	389	4.2.2.3 Modifikation unter Verwendung des schmelzflüssigen oder gelöst vorliegenden Schichtwerkstoffs	498	
3.2.3.1 Warmpressen	389	4.2.2.4 Beschichten aus der Gas- oder Dampfphase	506	
3.2.3.2 Faserspritzen	391	4.2.3 Nachbehandlung	510	
3.2.3.3 Handlaminieren	392	4.2.3.1 Reduzierung des gelösten Wasserstoffs	510	
3.2.3.4 Resin Transfer Molding (RTM) (Harzinjektionsverfahren)	393	4.2.3.2 Konservieren	510	
3.2.3.5 Vakuuminfusion	394	4.2.4 Entfernen von Schichten	511	
3.2.3.6 Faserwickeln	395	4.2.5 Thermisches Entgraten (TEM)	512	
3.2.3.7 Prepreg-Techniken	396	<b>4.3 Montagetechnik</b>	<b>513</b>	
<b>3.3 Produkte aus Keramik</b>	<b>397</b>	4.3.1 Grundlagen	513	
3.3.1 Einführung und geschichtliche Entwicklung	397	4.3.2 Der Materialfluss	516	
3.3.2 Bauteile aus Silikatkeramik	399	4.3.2.1 Lagern	516	
3.3.2.1 Rohstoffe	399	4.3.2.2 Puffern	517	
3.3.2.2 Aufbereitung	401	4.3.2.3 Bunkern	518	
3.3.2.3 Formgebung	402	4.3.2.4 Magazinieren	519	
3.3.2.4 Zwischenbearbeitung	402	4.3.2.5 Fördern	520	
3.3.2.5 Sintern	403	4.3.3 Fügearbeiten	523	
3.3.2.6 Oberflächenmodifikation	406	4.3.3.1 Fügestrukturen	523	
3.3.3 Produkte aus Nichtsilikatkeramik	406	4.3.3.2 Fügeverfahren	523	
3.3.3.1 Gewinnung der Rohstoffe	408	4.3.4 Montagearbeitsplätze	529	
3.3.3.2 Aufbereitung	412	4.3.4.1 Manuelle Montage	529	
3.3.3.3 Formgebung	415	4.3.4.2 Maschinelle Montage	532	
3.3.3.4 Zwischenbearbeitung	418	4.3.4.3 Montage 4.0	533	
3.3.3.5 Hochtemperaturbehandlung	420	4.3.5 Montageplanung	534	
3.3.3.6 Endbearbeitung	427	<b>5 Roboter im Fertigungsprozess</b>	<b>535</b>	
<b>3.4 Produkte aus Silikatglas</b>	<b>428</b>	<b>5.1 Einführung zur Robotertechnik</b>	<b>535</b>	
3.4.1 Geschichte der Silikatgläser	428	<b>5.2 Einteilung</b>	<b>536</b>	
3.4.2 Silikatgläser heute	430	<b>5.3 Kinematischer Aufbau</b>	<b>537</b>	
3.4.3 Rohstoffe und Aufbereitung	431	<b>5.4 Roboterprogrammierung</b>	<b>541</b>	
3.4.3.1 Rohstoffe	431	<b>5.5 Koordinatensysteme</b>	<b>544</b>	
3.4.3.2 Aufbereitung	432	<b>5.6 Robotersensorführung</b>	<b>545</b>	
3.4.4 Schmelzen und Raffinieren	433	<b>5.7 Bearbeitungsaufgaben</b>	<b>547</b>	
3.4.4.1 Schmelzen	433	<b>6 Laser in der Fertigungstechnik</b>	<b>549</b>	
3.4.4.2 Raffinieren	434	<b>6.1 Grundlagen zur Lasertechnik</b>	<b>549</b>	
3.4.5 Urformgebung	434	6.1.1 Wichtige Laserarten zur Bearbeitung	549	
3.4.5.1 Urformgebung unter Schwerkraft	435	6.1.2 Physikalische Grundlagen	550	
3.4.5.2 Urformgebung unter Druckanwendung	436	6.1.3 Aufbau von Laserstrahlquellen	551	
3.4.5.3 Temperung	438	6.1.4 Betriebs- und Wartungskosten	554	
3.4.5.4 Urformen durch Pulvertechnologie	439	6.1.5 Strahlführung zum Bearbeitungsort	554	
3.4.6 Spanlose Formgebung	439	6.1.5.1 Strahlführung mit Lichtleitkabel (LLK)	554	
3.4.7 Spanabhebende Formgebung	440	6.1.5.2 Strahlführung als Freistrah	556	
3.4.8 Fügen	440	6.1.5.3 Welding-on-the-fly	556	
3.4.9 Oberflächenmodifikation	440	6.1.6 Strahlformung am Bearbeitungsort	557	
<b>4 Fügen, Modifizieren und Montieren</b>	<b>443</b>	6.1.7 Strahlqualität	558	
<b>4.1 Stoffschlüssiges Fügen</b>	<b>443</b>			
4.1.1 Fügetechniken in einer Übersicht	443			
4.1.2 Schweißen von Metallen	444			
4.1.2.1 Pressschweißverfahren	446			
4.1.2.2 Schmelzschweißverfahren	457			
4.1.2.3 Werkstoffkundliche Aspekte	468			



<b>6.2</b>	<b>Werkstückbearbeitung</b>	<b>560</b>	8.4.6.4	Messtaster mit Inkrementalmaßstab	641
6.2.1	Grundlagen	560	8.4.6.5	Feinzeiger	641
6.2.1.1	Fokussierung	560	8.3.6.6	Fühlhebelmessgeräte	642
6.2.1.2	Verschmutzungsschutz	561	8.4.6.7	Winkelmessgeräte	643
6.2.1.3	Absorption	562	8.4.6.8	Neigungsmessgeräte	643
6.2.2	Laseranwendungen	563	8.4.6.9	Autokollimationsfernrohr (AKF)	645
6.2.2.1	Laserschweißen	563	8.4.7	Längenmessgeräte	649
6.2.2.2	Laserschneiden	567	8.4.7.1	Induktive und kapazitive Messtaster	649
6.2.2.3	Laserbohren	569	8.4.7.2	Trägerfrequenzverstärker	652
6.2.2.4	Laserlöten	570	8.4.7.3	Pneumatische Wegaufnehmer	653
6.2.2.5	Laserbearbeiten von Diamantwerkzeugen	570	8.4.7.4	Optische Wegaufnehmer	653
6.2.2.6	Laserbeschriften und Laserstrukturieren	571	8.4.8	Messtechnische Hilfsmittel	656
6.2.2.7	Laserhärten	572	8.4.9	Messgeräte	657
6.2.2.8	Laserbeschichten	572	8.4.9.1	Messmikroskop und Profilprojektor	657
<b>7</b>	<b>Additive Fertigung (AM)</b>	<b>573</b>	8.4.9.2	Komparator	659
<b>7.1</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>573</b>	8.4.10	Mehrstellenmessgeräte	661
<b>7.2</b>	<b>Ziele</b>	<b>573</b>	8.4.11	Laserscanner	662
<b>7.3</b>	<b>AM-Verfahren</b>	<b>576</b>	8.4.12	Formmessgeräte	662
7.3.1	Stereolithographie <sup>1</sup> (STL)	578	8.4.12.1	Formmessgeräte für runde Teile	663
7.3.2	Lasersintern (LS)	582	8.4.12.2	Geradheitsmessgeräte	664
7.3.3	Fused Layer Modeling (FLM)	587	<b>8.5</b>	<b>Interferometrische Messverfahren</b>	<b>665</b>
7.3.4	Material-Jetting und Binder-Jetting	588	8.5.1	Grundlagen	665
7.3.5	Bioplotter, Herstellung medizinischer Implantate	590	8.5.1.1	Aufbau von Interferometern zur Wegmessung	665
<b>7.4</b>	<b>Rapid Manufacturing (RM)</b>	<b>591</b>	8.5.1.2	Strahlungsquellen	667
			8.5.2	Einflüsse auf die Messunsicherheit	667
			8.5.3	Anwendungen der längenmessenden Interferometrie	668
			8.5.3.1	Kippwinkelmessung	669
			8.5.3.2	Geradheitsmessung	669
			8.5.3.3	Ebenheitsmessung	670
			8.5.4	Formprüfung	670
<b>Mess- und Prüftechnik</b>			<b>8.6</b>	<b>Oberflächenmesstechnik</b>	<b>671</b>
<b>8</b>	<b>Fertigungsmesstechnik</b>	<b>593</b>	8.6.1	Mechanische Oberflächenmessung	671
<b>8.1</b>	<b>Grundlagen der geometrischen Mess-technik</b>	<b>593</b>	8.6.2	Berührungslose Oberflächenmessung	673
8.1.1	Messabweichungen	595	8.6.2.1	Optische Oberflächenmesstechnik	673
8.1.1.1	Ordnung von Messabweichungen	596	8.6.2.2	Weißlichtinterferometer	673
8.1.1.2	Messabweichungen durch geometrische Einflüsse	597	8.5.2.3	Streulichtmessungen	673
8.1.1.3	Verformungen durch Eigengewicht, Messkraft, Spannkraft	602	8.6.3	Rastersondenmikroskope	674
8.1.1.4	Temperatureinfluss	606	8.6.3.1	Rasterkraftmikroskop (AFM – Atomic Force Microscope)	674
8.1.1.5	Abweichungen durch Schwingungen	608	8.6.3.2	Rastertunnelmikroskop (STM – Scanning Tunnel Microscope)	675
<b>8.2</b>	<b>Die Geometrische Produktspezifikation (GPS)</b>	<b>610</b>	8.6.4	Oberflächenkenngrößen	675
8.2.1	Das Konzept zur Tolerierung von Bauteilen	610	<b>8.7</b>	<b>Koordinatenmesstechnik</b>	<b>677</b>
8.2.2	GPS-Grundnormen	612	8.7.1	Einführung	677
8.2.3	Elementare Grundsätze des GPS-System – Das Prinzip des „Aufrufens“	613	8.7.2	Aufbau und Wirkungsweise	678
8.2.4	Maße und Ausgleichsgeometrien	615	8.7.3	Bauarten	679
<b>8.3</b>	<b>Maßverkörperungen</b>	<b>621</b>	8.7.4	Messsysteme	679
8.3.1	Endmaße	621	8.7.5	Zusatzausstattungen	682
8.3.1.1	Parallelendmaße	621	8.7.6	Steuerungen und Antriebe	683
8.3.2	Maßstäbe und Drehgeber	623	8.7.7	Messwertverarbeitung und Messwertauswertung	683
8.3.2.1	Strichmaße	623	8.7.8	Tastelementkalibrierung	686
8.3.2.2	Inkrementalmaßstäbe	623	8.7.9	Planung und Durchführung eines Messauftrags	687
8.3.2.3	Absolutmaßstäbe	627	8.7.10	Messprogrammerstellung	689
<b>8.4</b>	<b>Form- und Lagebestimmung</b>	<b>628</b>	<b>8.8</b>	<b>Röntgen-Computertomographie (CT)</b>	<b>693</b>
8.4.1	Gerade	628	8.8.1	Funktionsweise	693
8.4.2	Ebene	630	8.8.2	Anlagentechnik	694
8.4.2.1	Messplatten	630	8.8.3	Auflösung	696
8.4.2.2	Ebenheitsprüfung	631	8.8.4	Anwendungen	697
8.4.3	Kreis, Zylinder	632	<b>8.9</b>	<b>Messen und Prüfen durch Bildverarbeitung</b>	<b>700</b>
8.4.4	Winkelverkörperungen	633	8.9.1	Grundlagen	701
8.4.4.1	Rechter Winkel	633	8.9.2	Szenenbeleuchtung	704
8.4.4.2	Beliebige Winkel	634	8.9.3	2D-Bildverarbeitung	708
8.4.5	Lehren	635	8.9.4	3D-Bildaufnahme und Digitalisierung	713
8.4.6	Anzeigende Messgeräte	637	8.9.5	Laser-Trackingsysteme	716
8.4.6.1	Messsschieber	637			
8.4.6.2	Messschrauben	638			
8.4.6.3	Messuhren	640			

<b>9 Werkstoffprüfung</b>	<b>717</b>	<b>11.2 Qualifizierung von Industrierobotern</b>	<b>819</b>
<b>9.1 Einführung</b>	<b>717</b>	11.2.1 Übersicht und Allgemeines	819
<b>9.2 Chemische Zusammensetzung</b>	<b>718</b>	11.2.2 Pose-Genauigkeit und Pose-Wiederholgenauigkeit	820
<b>9.3 Innere Werkstofftrennungen</b>	<b>721</b>	11.2.3 Lineargenauigkeit/Bahngenauigkeit	823
9.3.1 Penetrationsverfahren <sup>1</sup>	721	11.2.4 Formgenauigkeit/Ebenengenauigkeit	824
9.3.2 Wirbelstromverfahren	722	11.2.5 Dynamisches Bewegungsverhalten	825
9.3.3 Streuflussverfahren	723	11.2.6 Positions-Stabilisierungszeit	826
9.3.4 Durchstrahlung	725	11.2.7 Statische Nachgiebigkeit	827
9.3.5 Durchschallung	727	11.2.8 Weitere Merkmale	827
<b>9.4 Härteprüfung</b>	<b>730</b>	<b>Anhang: Kleine Werkstoffkunde der Metalle</b>	
9.4.1 Quasistatische Eindringhärteprüfverfahren	731	<b>A 1 Werkstoffe</b>	<b>828</b>
9.4.1.1 Härteprüfverfahren nach Brinell	732	<b>A 1.1 Entwicklungsphasen</b>	<b>828</b>
9.4.1.2 Härteprüfverfahren nach Vickers	736	<b>A 1.2 Eigenschaften der Konstruktionswerkstoffe</b>	<b>830</b>
9.4.1.3 Härteprüfverfahren nach Rockwell	739	A 1.2.1 Einleitung	830
9.4.2 Dynamische Härteprüfverfahren	742	A 1.2.2 Dichte	830
<b>9.5 Gefüge</b>	<b>744</b>	A 1.2.3 Elastizitätsmodul und Bruchzähigkeit	831
9.5.1 Lichtmikroskopische Darstellung	744	A 1.2.4 Versagensspannung	832
9.5.1.1 Probennahme	745	A 1.2.5 Wärmeleitfähigkeit	833
9.5.1.2 Herstellung des Schiffs	746	A 1.2.6 Temperaturleitfähigkeit	834
9.5.1.3 Gefügebewertung	748	A 1.2.7 Verlustfaktor	835
9.5.2 Elektronenmikroskopische Darstellung	749	A 1.2.8 Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	836
<b>9.6 Mechanische Eigenschaften</b>	<b>751</b>	A 1.2.9 Zusammenfassung	837
9.6.1 Zugversuch	751	<b>A 2 Atomaufbau und Bindungstypen</b>	<b>838</b>
9.6.2 Druckversuch	758	<b>A 2.1 Metallbindung</b>	<b>838</b>
9.6.3 Torsionsversuch	760	<b>A 2.2 Atombindung</b>	<b>839</b>
9.6.4 Kerbschlagbiegeversuch	761	<b>A 2.3 Ionenbindung</b>	<b>839</b>
9.6.5 Schwingfestigkeitsversuch	763	<b>A 3 Aufbau metallischer Werkstoffe</b>	<b>840</b>
9.6.6 Bruchmechanik	770	<b>A 3.1 Gitteraufbau des Idealkristalls</b>	<b>840</b>
9.6.7 Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung	775	<b>A 3.2 Gitterfehler im Realkristall</b>	<b>842</b>
9.6.7.1 Schädigungsmechanismen	775	A 3.2.1 Punktförmige Gitterfehler	842
9.6.7.2 Durchführung des Zeitstandversuchs	776	A 3.2.2 Linienförmige Gitterfehler	844
		A 3.2.3 Flächige Gitterfehler	845
<b>10 Maschinen- und Bauteilverhalten</b>	<b>779</b>	<b>A 3.3 Gleichgewichtszustände</b>	<b>847</b>
<b>10.1 Bauteilprüfung</b>	<b>779</b>	A 3.3.1 Bei lückenloser Mischkristallreihe	847
10.1.1 Kennwerte für Werkstoffe und Bauteile	779	A 3.3.2 Unlöslichkeit im festen Zustand	848
10.1.2 Nachweis der Betriebsfestigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen	781	A 3.3.3 Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand	848
10.1.2.1 Auswahl schwingbruchgefährdeter Querschnitte	781	A 3.3.4 Intermetallische bzw. intermediäre Phase	850
10.1.2.2 Experimentelle Beanspruchungsanalyse	781	<b>A 3.4 Phasenumwandlungen</b>	<b>851</b>
10.1.2.3 Datenaufbereitung und Zählverfahren	783	A 3.4.1 Erstarrung	851
10.1.2.4 Festlegung der Versuchslasten	785	A 3.4.2 Umwandlungen im festen Zustand	856
10.1.2.5 Prüfstandsversuche	786	<b>A 4 Eigenschaften metallischer Werkstoffe</b>	<b>858</b>
10.1.2.6 Serienüberwachung und Qualitätskontrolle	788	<b>A 4.1 Thermische Leitfähigkeit</b>	<b>858</b>
10.1.3 Innendruckprüfung	789	<b>A 4.2 Verformung bei nur unbedeutenden Diffusionsprozessen</b>	<b>858</b>
10.1.3.1 Pulsationsform	789	A 4.2.1 Elastische Verformung	858
10.1.3.2 Prüfmedien	790	A 4.2.2 Plastische Verformung	859
10.1.3.3 Prüfeinrichtung	790	<b>A 4.3 Verfestigung</b>	<b>862</b>
10.1.3.4 Versuchsergebnisse	791	A 4.3.1 Verfestigung durch linienförmige Gitterfehler	862
10.1.4 Umweltprüfverfahren	793	A 4.3.2 Verfestigung durch flächige Gitterfehler	863
10.1.4.1 Vibrationsprüfungen und Schockprüfungen	793	A 4.3.3 Verfestigung durch punktförmige Gitterfehler	867
<b>10.2 Schwingungen von Maschinen und Bauteilen</b>	<b>797</b>	<b>A 4.4 Verfestigungsabbau</b>	<b>867</b>
10.2.1 Einführung	797	A 4.4.1 Erholung	867
10.2.2 Eigenfrequenzen und Eigenformen	798	A 4.4.2 Rekristallisation	868
10.2.3 Modalanalyse	799	<b>A 4.5 Plastische Verformung bei Diffusionsprozessen</b>	<b>869</b>
10.2.3.1 Rechnerische Modalanalyse <sup>1</sup>	799	<b>Fachwörterbuch Deutsch-Englisch, Sachwortverzeichnis</b>	<b>870</b>
10.2.3.2 Experimentelle Modalanalyse	800	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>895</b>
10.2.3.3 Beispiele zur Modalanalyse	803		
<b>11 Qualifizierung von Maschinen</b>	<b>805</b>		
<b>11.1 Qualifizierung von Werkzeugmaschinen</b>	<b>805</b>		
11.1.1 Einleitung und Übersicht	805		
11.1.2 Direkte Messungen der Maschineneigenschaften	806		
11.1.3 Abnahme- und Prüfwerkstücke	812		
11.1.4 Fähigkeitsuntersuchungen	816		



## Fertigungsverfahren

# 1 Einführung in die industrielle Fertigungstechnik

## 1.1 Fertigungstechnik als eine Triebfeder der Menschheit

### Ziel und Aufgabe

Die Fertigungstechnik hat zum Ziel Gegenstände aller Art möglichst günstig und verkaufsfähig zu fertigen. Die wichtigsten Arten der Gegenstände sind:

- Gebrauchsgegenstände,
- Fertigungsmittel,
- Vorprodukte und in kleinerem Umfang auch
- Kultgegenstände und Kunstgegenstände (**Bild 1**).

Die Gegenstände können sowohl relativ einfach sein, wie z.B. ein Kochtopf, als auch sehr komplex, nämlich aus vielen zusammenwirkenden Bauteilen bestehen, wie z.B. ein Kraftfahrzeug.

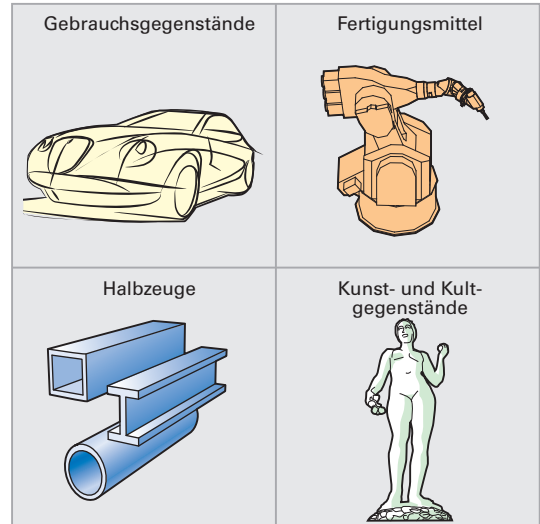
Während die *Gebrauchsgegenstände* meist für den Endverbraucher gefertigt werden, dient die Herstellung von *Fertigungsmitteln* wiederum der Fertigung selbst.

Hierzu zählt z.B. ein Bohrer oder eine Werkzeugmaschine, also maschinelle Werkzeuge (Maschinenwerkzeuge), die die Herstellung von Gegenständen erleichtern und verbessern. Die Einzelteile der herstellenden Gegenstände werden während des Fertigungsprozesses als *Werkstücke* bezeichnet.

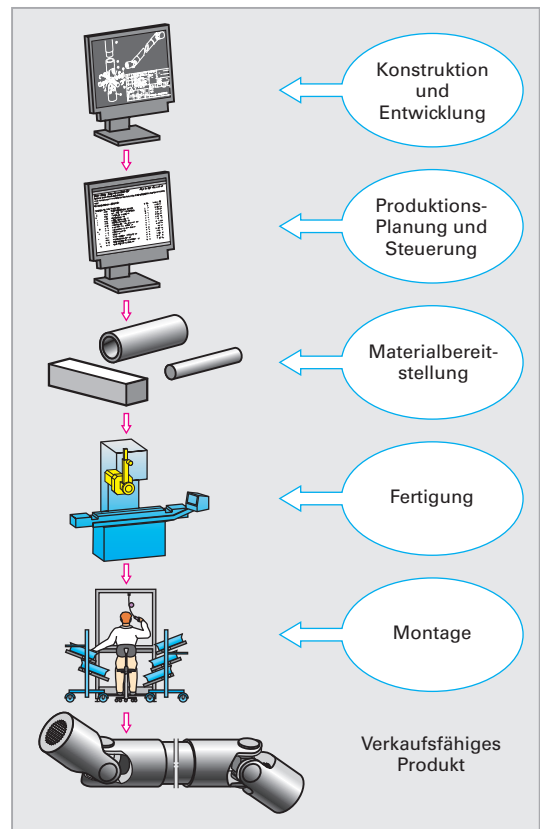
Die Fertigung setzt neben den Fertigungsplänen, den *Fertigungsverfahren* und den *Fertigungsmitteln* auch die *Fertigungsrohstoffe* bzw. die *Fertigungshalbfabrikate* voraus. Die Fertigungsrohstoffe sind z.B. Metalle, Kunststoffe und Hölzer. Damit diese in einem Fertigungsprozess verarbeitet werden können sind sie in Vorproduktionen meist in eine bestimmte Form und Qualität zu bringen. So werden Metalle z.B. als *Masseln* bzw. *Barren* nach dem Erschmelzen hergestellt. Für viele Fertigungsprozesse sind Halbfabrikate praktisch und auch notwendig, z.B. Rohre, Bleche und Profilstangen.

Die Hauptschritte im Fertigungsprozess sind, ausgehend von einem konstruierten und entwickelten Produkt: Die Produktionsplanung und -steuerung, die Materialbereitstellung, die Fertigung der Werkstücke, die Montage (**Bild 2**).

Der Fertigungsprozess wird begleitet vom **Qualitätsmanagement**. Abgeschlossen wird der Fertigungsprozess mit einem in der Qualität gesicherten und verkaufsfähigen Produkt.



**Bild 1: Produkte der Fertigungstechnik**



**Bild 2: Fertigungsablauf**

## Art der Fertigung

Die Fertigung erfolgt in

- handwerklicher Art oder
- industriell.

Die **handwerkliche Fertigung** gibt es als Handwerkskunst seit Beginn der Menschheit. Sie kennzeichnet, zusammen mit den herausragend verwendeten Rohstoffen, die Epochen der Menschheitsgeschichte u.a. Steinzeit, Bronzezeit, Eisenzeit (**Bild 1**).

Es sind also die Fortschritte in den Fertigungstechniken bzw. die zugehörigen Rohstoffe, welche die Hauptentwicklungen der Menschheit bestimmt haben und heute noch bestimmen.

Das 19. und 20. Jahrhundert waren entscheidend geprägt von der **industriellen Fertigung**. Diese ist gekennzeichnet durch

- Arbeitsteilung,
- Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung,
- Einsatz von Hilfsenergie (**Bild 2**),
- Einsatz von maschinellen Werkzeugen (**Bild 3**), auch mit Informationsverarbeitung und technischer Kommunikation.

Die arbeitsteilige, industrielle Fertigung ermöglicht eine kostengünstige Serienfertigung, setzt aber gleichzeitig eine *hohe Genauigkeit und Qualität* voraus. Die Einzelwerkstücke einer Serie sind austauschbar und die Bestandteile müssen, auch wenn sie in unterschiedlichen Prozessen hergestellt sind und von unterschiedlichen Lieferanten stammen, zusammenpassen.

## Erfolg und Wohlstand

Die Erfolge der industriellen Fertigung haben uns – vor allem in der westlichen Welt – den Wohlstand gebracht, und zwar neben einer üppigen Grundversorgung

- die großen Möglichkeiten der Freizeitgestaltung,
- die medizinischen Versorgung,
- die hohe Lebenserwartung,
- die große Mobilität und
- die weltweite Kommunikation.

Der industriellen Fertigung verdanken wir z. B. die Verkehrsmittel, wie z. B. Auto, Bahn, Flugzeug, die elektrische Stromversorgung, die Haushaltsgeräte u. v. m., also fast alle Dinge unseres täglichen Lebens. Ohne eine industrielle Fertigung wären wir auf der Stufe der ärmsten Entwicklungsländer mit Hunger und Not.



**Bild 1:** Handwerklicher Schmiedebetrieb, dargestellt auf einer historischen Eisengussplatte, v. I. Aphrodite, Hephaistos



**Bild 2:** Karikatur zur industriellen Fertigung, zu Beginn des 20. Jahrhunderts



**Bild 3:** Karosseriefertigung mit Robotern

## 1.2 Die Fertigungsverfahren im Überblick

Die Fertigungsverfahren werden eingeteilt nach den Verfahren wie man Werkstücke formt und/oder die Stoffeigenschaften ändert<sup>1</sup>. Kennzeichnend ist dabei, wie der Zusammenhalt der stofflichen Bestandteile eines Werkstücks sich darstellt<sup>1</sup>.

Man unterscheidet Fertigungsverfahren, welche die Bauteilform dadurch bestimmen, dass stofflicher Zusammenhalt

- geschaffen wird, → **Urformen**
- beibehalten wird, → **Umformen**
- vermindert wird, → **Trennen**
- vermehrt wird. → **Fügen**

Neben *formbildend* bzw. *formändernd* können die Fertigungsverfahren auch die Stoffeigenschaften verändern, z.B. durch Gefügeveränderungen (Umlagern von Stoffteilchen), durch Nitrieren (Einbringen von Stoffteilchen) oder durch Entkohlen (Aussondern von Stoffteilchen).

Entsprechend zu den Merkmalen des stofflichen Bauteilzustehens werden die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen nach DIN 8580 eingeteilt (**Bild 1**, folgende Seiten).

1. **Urformen** ist das Fertigen eines festen Körpers aus einem formlosen Stoff. Formlose Stoffe sind insbesondere flüssige Metalle und Kunststoffe, aber auch Pulver, Fasern, Granulate und Gase.

Neu sind hierbei die *additiven* Verfahren, bei denen einzelne Volumenelemente oder dünne Schichten aufeinander gesetzt werden, z.B. durch 3D-Druck, Lasersintern oder durch Stereolithographie (**Bild 1**).

2. **Umformen** ist das Fertigen eines festen Körpers durch *bildsames*, nämlich *plastisches*<sup>2</sup> Ändern der Form eines festen Körpers. Dabei bleibt der Stoffzusammenhalt erhalten.

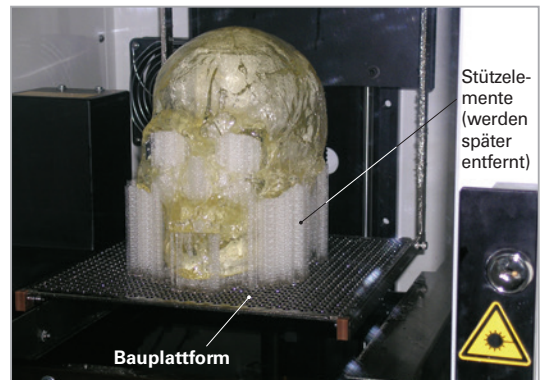
Der Umformvorgang bezieht sich nicht immer auf das ganze Werkstück. Er kann sich auf Teilbereiche eines Werkstücks beziehen oder auch lokal fortschreitend sein, z.B. beim Walzen. Neben dem Ziel der Gestaltänderung verfolgt man beim Umformen auch das Ziel die Oberflächenbeschaffenheit und die Werkstoffeigenschaften zu verändern.

3. **Trennen** ist das Fertigen geometrisch fester Körper durch Formändern und durch Vermindern des stofflichen Zusammenhalts: das Trennen durch Zerteilen, z.B. Abschneiden, durch Spanen, z.B. Fräsen, durch Abtragen z.B. Erodieren, durch Zerlegen, z.B. Lösen von Fügeverbindungen und durch Reinigen, z.B. Reinigungsstrahlen.

4. **Fügen** ist das Fertigen eines festen Körpers durch das Zusammenbringen mehrerer fester Bauteile mithilfe von Verbindungselementen oder Verbindungsstoffen. Dies geschieht durch Zusammenlegen, z.B. Ineinanderschieben, durch Umformen, durch Verschrauben, durch Gießen, durch Stoffverbinden, z.B. Schweißen.

5. **Beschichten** ist Fertigen durch das Aufbringen eines formlosen pulverigen, flüssigen oder gasförmigen Stoffes auf einen festen Körper. Durch das Beschichten verfolgt man einen Schutz der Werkstücke vor Verschleiß, Korrosion, Hitze u.a. und/oder man erzeugt gewünschte Oberflächenfarben und -texturen sowie bestimmte elektrische Eigenschaften (leitend/nicht leitend).

6. **Stoffeigenschaftändern** ist das Fertigen durch Verändern der Werkstoffeigenschaften. Dies kann auf bestimmte Orte oder auf die Werkstückoberfläche beschränkt sein. Beispiele sind das Härten, Vergüten, Magnetisieren, Entkohlen, Dehydrieren, Aufkohlen, Nitrieren.



**Bild 1: Stereolithographie (Beispiel<sup>3</sup>)**

<sup>1</sup> DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung

<sup>2</sup> plastisch von griech. *plastikos* = „zum Gestalten (Formen) gehörig“, Plastik = Kunst des Gestaltens

<sup>3</sup> Im Beispiel wird ein Replikat eines steinzeitlichen Schädels hergestellt. Die Daten wurden durch Röntgen-Computer-Tomographie (CT) gewonnen (siehe Seite 693).

Tabelle 1: Urformen (Hauptgruppe 1)


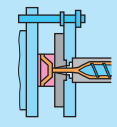

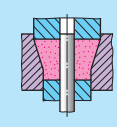

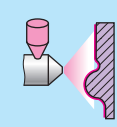
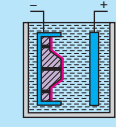
Aus flüssigem Zustand	Aus plast. Zustand	Aus breiigem Zustand	Aus Körnern od. Pulvern	Aus Spänen od. Fasern	Mit Gas od. Dampf	Aus ionisiertem Zustand
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwerkraftgießen</li> <li>• Druckgießen</li> <li>• Schleudern</li> <li>• Stranggießen</li> <li>• Schäumen</li> <li>• Tauchformen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Press-, Blasformen</li> <li>• Spritzgießen</li> <li>• Spritz- und Strangpressen</li> <li>• Ziehformen</li> <li>• Kalandrieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beton- und Gips gießen</li> <li>• Porzellan und Keramik gießen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressen</li> <li>• Sandformen</li> <li>• Thermisches Spritzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spanplatten herstellen</li> <li>• Faserplatten herstellen</li> <li>• Papier herstellen</li> </ul>	Abscheiden in eine Form	Abscheiden in eine Form (elektrolytisch)

Tabelle 2: Umformen (Hauptgruppe 2)

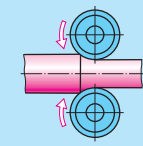
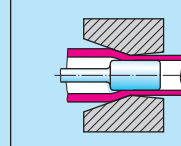
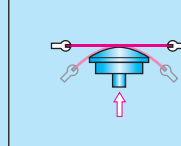
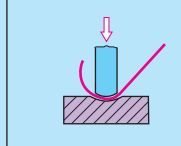
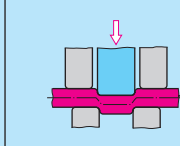
Druckumformen	Zugdruckumformen	Zugumformen	Biegeumformen	Schubumformen
				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Walzen</li> <li>• Freiformen</li> <li>• Gesenkformen</li> <li>• Eindringen</li> <li>• Druckdrücken</li> <li>• Umformstrahlen</li> <li>• Oberflächenveredelungsstrahlen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchziehen</li> <li>• Tiefziehen</li> <li>• Drücken</li> <li>• Kragenziehen</li> <li>• Knickbauchen</li> <li>• Innenhochdruck-Weitstauchen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Längen</li> <li>• Weiten</li> <li>• Tiefen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegeumformen mit Geradliniger Bewegung</li> <li>• Biegeumformen mit drehender Bewegung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschieben mit geradliniger Bewegung</li> <li>• Verschieben mit drehender Bewegung</li> </ul>

Tabelle 3: Trennen (Hauptgruppe 3)

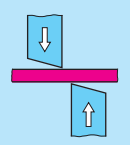
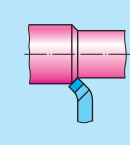
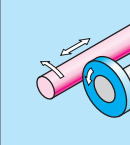
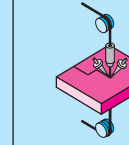
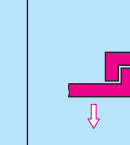
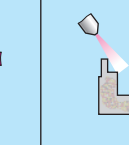
Zerteilen	Spanen mit geom. best. Schneiden	Spanen mit geom. unbest. Schneiden	Abtragen	Zerlegen	Reinigen
					
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Scherschneiden</li> <li>• Messerschneiden</li> <li>• Beißschneiden</li> <li>• Spalten</li> <li>• Reißen</li> <li>• Brechen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drehen</li> <li>• Bohren, Senken, Reiben</li> <li>• Fräsen</li> <li>• Hobeln, Stoßen</li> <li>• Räumen</li> <li>• Sägen</li> <li>• Feilen, Raspeln</li> <li>• Bürstenspanen</li> <li>• Schaben, Meißeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schleifen mit Rotierendem Werkzeug</li> <li>• Bandschleifen</li> <li>• Hubschleifen</li> <li>• Honen</li> <li>• Läppen</li> <li>• Strahlspanen</li> <li>• Gleitspanen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermisches Abtragen</li> <li>• Chemisches Abtragen</li> <li>• Elektrochem. Abtragen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auseinandernehmen</li> <li>• Lösen kraftschlüssiger Verbindungen</li> <li>• Zerlegen gefügter Teile</li> <li>• Ablöten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mechanisch</li> <li>• strömungstechnisch</li> <li>• chemisch</li> <li>• thermisch</li> <li>• mit Lösungsmitteln</li> <li>• durch Strahlen</li> </ul>



Tabelle 1: Fügen (Hauptgruppe 4)

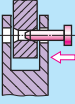

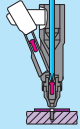
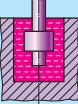
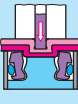



Zusammen- setzen	Füllen	An- und Einpressen	Urformen	Umformen	Schweißen	Löten	Kleben
							
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auflegen</li> <li>• Aufsetzen</li> <li>• Schichten</li> <li>• Einlegen, Einsetzen</li> <li>• Einschieben</li> <li>• Einhängen</li> <li>• Einrenken</li> <li>• Einspreizen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfüllen</li> <li>• Tränken, Imprägnieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schrauben</li> <li>• Klemmen</li> <li>• Klammern</li> <li>• Einpressen</li> <li>• Nageln, Verstiften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgießen</li> <li>• Einbetten</li> <li>• Vergießen</li> <li>• Galvanisieren</li> <li>• Ummanteln</li> <li>• Kitten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Draht Umformen</li> <li>• Blech Umformen</li> <li>• Nieten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressschweißen</li> <li>• Schmelzschweißen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weichlöten</li> <li>• Hartlöten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kleben physik. abbündend</li> <li>• Kleben chem. abbündend</li> </ul>

Tabelle 2: Beschichten (Hauptgruppe 5)



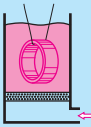

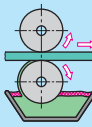
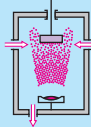
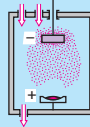
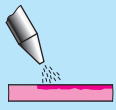

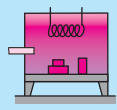
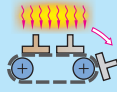
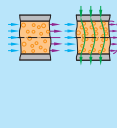
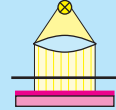
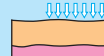
Aus flüssigem Zustand	Aus breiigem Zustand	Mit Körnern oder Pulvern	Durch Schweißen	Durch Löten	Durch Gase od. Dämpfe	Durch Ionisieren
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schmelztauchen</li> <li>• Lackieren</li> <li>• Färben</li> <li>• Emaillieren</li> <li>• Gießen</li> <li>• Drucken</li> <li>• Beschriften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spachteln</li> <li>• Putzen, Verputzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wirbelsintern</li> <li>• elektrostatisch Spritzen</li> <li>• thermisch Spritzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schmelzauftragsschweißen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auftragweichlöten</li> <li>• Auftraghartlöten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vakuumbedampfen</li> <li>• Vakuumbestäuben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• galvanisch</li> <li>• chemisch</li> </ul>

Tabelle 3: Stoffeigenschaft ändern (Hauptgruppe 6)

Verfestigen durch Umformen	Wärme- behandeln	Thermomech. Behandeln	Sintern, Brennen	Magnetisieren	Photochemisch Behandeln
					
<ul style="list-style-type: none"> <li>• mech. Strahlen</li> <li>• Walzen</li> <li>• Ziehen</li> <li>• Schmieden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glühen</li> <li>• Härten</li> <li>• Isotherm. Umwandeln</li> <li>• Anlassen</li> <li>• Vergüten</li> <li>• Tiefkühlen</li> <li>• Thermochemisch Behandeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Austenitformhärten</li> <li>• Heißisostatisches Pressen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgießen</li> <li>• Einbetten</li> <li>• Vergießen</li> <li>• Eingalvanisieren</li> <li>• Ummanteln</li> <li>• Kitten</li> </ul>	<b>Bestrahlen</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laserstrahlen</li> <li>• Thermostrahlen</li> <li>• Molekularstrahlen</li> <li>• Ionenstrahlen</li> </ul>	

## 1.3 Entwicklungsphasen der industriellen Technik

### Erste industrielle Revolution: Kraftmaschinen

Die erste industrielle Revolution begann **um 1800** mit der Mechanisierung der Produktion mit **Dampfkraft (Bild 1)**. Die Muskelkraft der Menschen und Tiere sowie in Teilen die Wasserkraft wurde durch Dampfmaschinen ersetzt. Zum Ende des 18. Jahrhunderts kamen als Antriebsaggregate Elektromotoren und Verbrennungsmotoren hinzu. Es entwickelten sich aus den bisherigen Manufakturen Fabriken. Man begann serienidentische Teile herzustellen.

### Zweite industrielle Revolution: Fließband

Mit der zweiten industriellen Revolution kam die Serienproduktion mit Einführung des Fließbandes. So wurden mit Beginn des **20. Jahrhunderts** neben Waffen auch Kraftfahrzeuge und Haushaltsgeräte in großen Serien produziert (**Bild 2**).

### Dritte industrielle Revolution: Elektronik und Computer

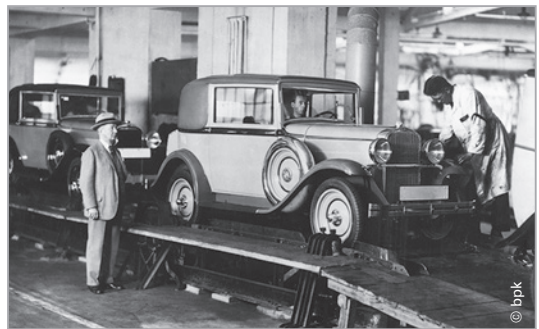
Die dritte industrielle Revolution begann **um 1970** mit der Verwendung von Transistoren und Dioden zur digitalen Datenverarbeitung in Maschinensteuerungen. Man begann Maschinen numerisch (digital) zu steuern. Es entstand die numerische Steuerung (Numerical Control, NC). Die **NC-Maschine (Bild 3)** verdrängte Zug um Zug handgesteuerte und mechanisch automatisierte Maschinen. Der wirkliche Durchbruch kam mit der Entwicklung der integrierten Schaltkreise und Mikroprozessoren und deren Integration in Maschinensteuerungen und in Produkte, z. B. als Mikrorechner und als speicherprogrammierte Steuerungen (SPS).

Eingeführt sind seither die **CAX-Systeme**:

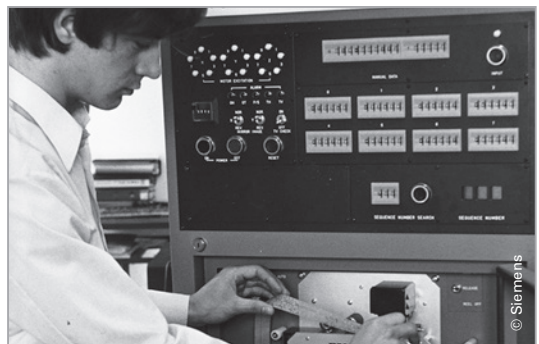
- **CAD-Systeme** (Design) für das Zeichnen und Konstruieren (**Bild 4**),
- **CAM-Systeme** (Manufacturing) für den Herstellungsprozess,
- **CAQ-Systeme** (Quality-Assurance) für das Qualitätsprüfung und
- **CIM** (Computerintegrierte Fertigung) für die Gesamtheit der Produktionskette.



**Bild 1: Der Schmiedehammer, Gemälde von Friedrich von Keller (1887)**



**Bild 2: Der 10000. Opel läuft vom Band (1931)**



**Bild 3: NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)**



**Bild 4: 2D-CAD-System (1998)**



### Vierte industrielle Revolution: Internet

Die vierte industrielle Revolution ist etwa seit dem **Jahr 2000** geprägt durch die Allgegenwart des **Internets**.

Das Internet<sup>1</sup>, wurde beginnend ab 1980 als Plattform zum Datenaustausch unter den Großrechnern der Universitäten und Forschungsinstitute eingeführt. Nun ist das Internet bei jedermann angekommen, in alle Bereiche der Gesellschaft vorgedrungen und lebensbestimmend geworden. Es dient nicht mehr nur zur bloßen Übermittlung von Information sondern wurde maßgeblicher Bestandteil zur Steuerung und Regelung von Vorgängen aller Art. Es gibt weltweit mehr als eine halbe Milliarde Webserver.

Mithilfe des Internets werden

- Bankgeschäfte abgewickelt,
- Steuererklärungen gemacht,
- telefoniert,
- Waren geordert und zum Kunden gelenkt,
- Produktionsprozesse angestoßen, gesteuert und überwacht.

**Ein großflächiger und ein länger anhaltender Ausfall des Internets wäre eine große, lebensbedrohende Katastrophe.**

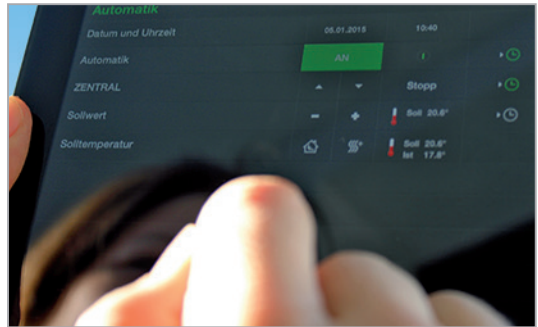
Die Integration internetfähiger bzw. kommunikationsfähiger Elektronik in die Dinge des Alltags, z.B. in Mobiltelefone, in Kameras, in Fahrzeuge und in Maschinen und Anlagen ermöglicht eine allumfassende Information und das Ingangsetzen selbsttätig entfernt ablaufender Prozesse (**Bild 1**).

Die Vernetzung von physikalisch-technischen Systemen mit virtuellen, nämlich programmierten Prozessen wird zum „Internet der Dinge und Dienste“ und kennzeichnet die vierte industrielle Revolution.

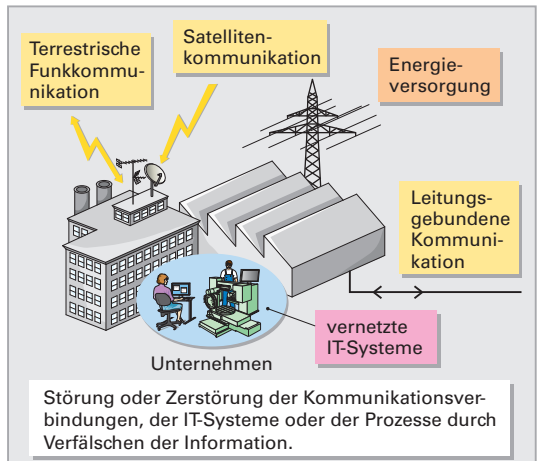
**Mit Industrie 4.0** wird die vierte industrielle Revolution, nämlich die totale digitale Vernetzung der Maschinen, Anlagen und Produkte sowie der zugehörigen Dienste eingeleitet.

#### Gefahren bei Industrie 4.0

Steuerungsgeräte von Produktionsmaschinen (SPS) waren lange Zeit eine eigene Welt mit eigener, firmenspezifischer Software und Hardware, mit dem Problem mit Konkurrenzprodukten nicht kompatibel und kommunikationsfähig zu sein. Inzwischen sind diese Geräte über Standards vernetzt. Das hat Standardisierungsvorteile, das hat



**Bild 1: Temperatursteuerung über ein Smartphone**



**Bild 2: Gefahren im IT-Bereich**

alle Vorteile der Fernwartung und Fernsteuerung aber es hat den entscheidenden Nachteil üblichen Hacker-Angriffsmethoden ausgesetzt zu sein.

**Gefahren** gibt es durch Fehler oder Sabotage in den Netzwerken: Durch Ausfall oder Fehlschaltungen von Verbindungen und von Servern für die Kommunikation, die Produktion, die Logistik, die Energieübertragung, usw. (**Bild 2**).

**Gefahren** gibt es durch Spionagesysteme und *malware*<sup>2</sup> (Schadprogramme), welche darauf ausgerichtet sind Zerstörungen anzurichten und Unheil zu bringen.

IT-Systeme allgemeiner Art werden häufig mit Anlagensteuerungen verbunden oder in diese integriert. Hier ist eine hinreichende Segregation (Trennung) unerlässlich, um zu verhindern, dass sich Schadprogramme und Ausspähungen über Teilsystemgrenzen hinweg ausbreiten können.

<sup>1</sup> Internet von engl. internetwork = Zwischen Netzwerk, miteinander verbundene Netze

<sup>2</sup> engl. malware, Kunstwort aus engl. malicious = bösartig und software



### Cyber-Physische-Systeme (CPS)

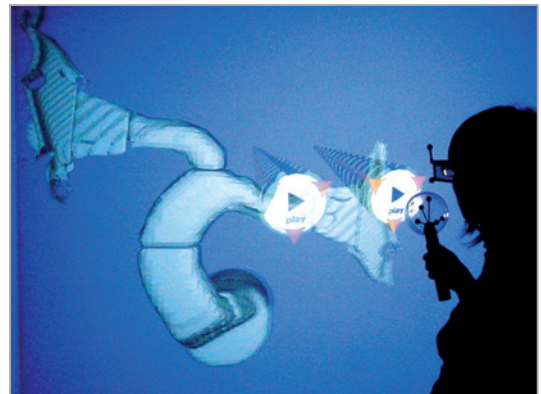
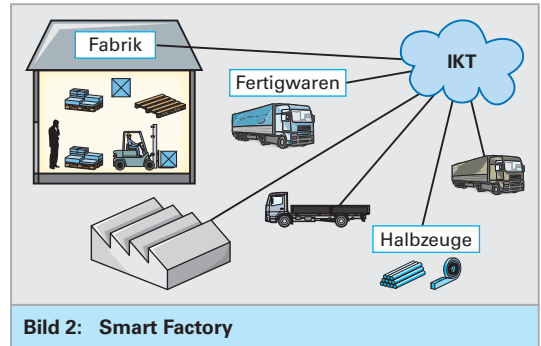
Eine zunehmende Bedeutung haben die **Cyber-Physical-Systems**<sup>1</sup> (CPS). Sie ermöglichen durch eine angehängte Kommunikationstechnik die Vernetzung von eingebetteten Systemen untereinander und mit dem Internet. Dabei wird die frühere hierarchische und lokal konzentrierte Struktur aufgelöst (**Bild 1**).

CPS sind die technologische Grundlage für Industrie 4.0. Die besondere Eigenschaft der CPS ist, dass CPS als *smart* d.h. geschickt und intelligent empfunden werden. So leiten sich daraus unmittelbar Produktnamen ab, wie z.B. *Smartphone* oder *Smart-TV* für internetfähige Mobiltelefone bzw. Fernsehgeräte.

Die Entwicklungen der Cyber-Physische Systeme beschränken sich nicht nur auf Einzelprodukte sondern gelten auch für Großsysteme wie z. B.:

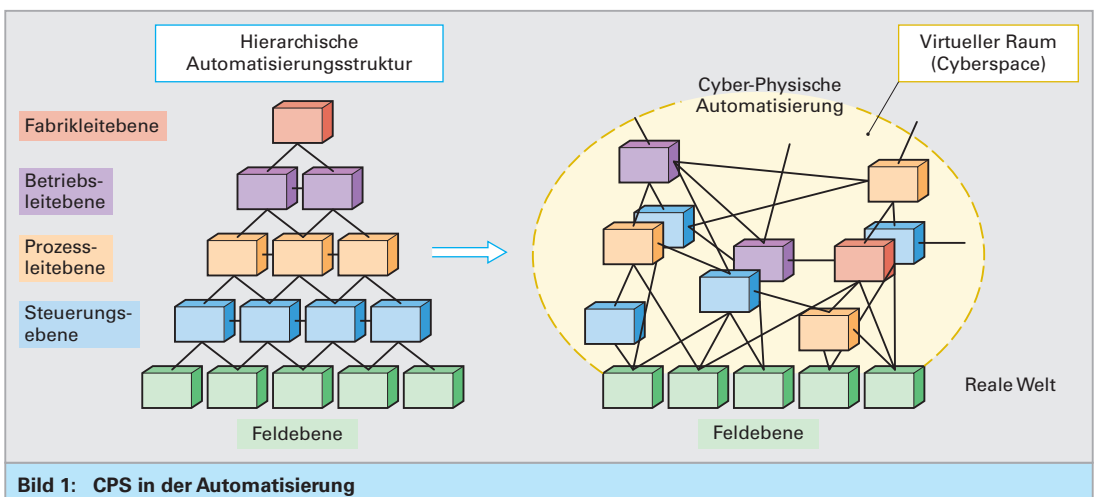
**Smart Factory**<sup>2</sup>: Mit IKT (Informations- und Kommunikationstechnik) vernetzte Unternehmen, Maschinen, Anlagen, Zulieferer und Logistiker, um auf Kundenwünsche schnell und flexibel reagieren zu können (**Bild 2**).

**Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 18.08.2014 (Zitat):** Beim Thema „Smart Factory“ liegen die Schwerpunkte auf intelligenten Produktionssystemen und -verfahren sowie auf der Realisierung verteilter und vernetzter Produktionsstätten. Unter der Überschrift „Smart Production“ werden unter anderem die unternehmensübergreifende Produktionslogistik, die Mensch-Maschine-Interaktion und 3D in industriellen Anwendungen (**Bild 3**) noch stärker in den Blick genommen.



<sup>1</sup> cyber, altgriechische Vorsilbe für Steuerung... (des Seemanns) – ursprünglich die Steuerkunst des Seefahrers. Davon abgeleitet ist die Wissenschaft der Kybernetik = Regelungstechnik, Steuerungstechnik und Sensortechnik, heute meist in Verbindung mit Mikrocomputern, Mikroschaltkreisen und Mikromechanik.

<sup>2</sup> smart factory = intelligente (kluge) Fabrik



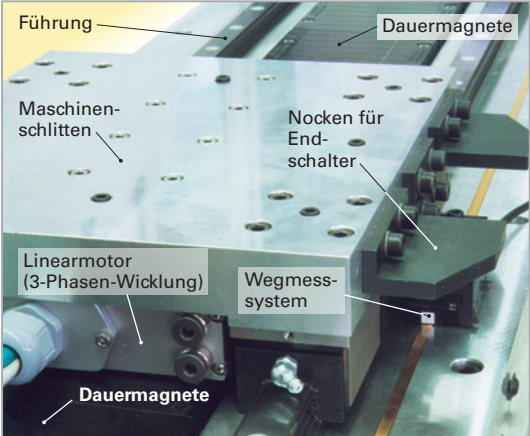
# 1.5 Aktuelle Ziele und Entwicklungen

## 1.5.1 Werkzeugmaschinen

Die Werkzeugmaschine ist das Produktionsmittel, das die Leistungsfähigkeit einer Fertigung aus technischer Sicht am meisten bestimmt. Für die wichtigsten Fertigungsverfahren wie Drehen, Fräsen, Schleifen, Warm- und Kaltumformen wurden die zugehörigen Maschinen schon im vorletzten Jahrhundert entwickelt und sind uns als Drehmaschine, Fräsmaschine, Schleifmaschine, Schmiedehammer und Exzenterpresse bekannt. Die Maschinen von heute sind in den Grundzügen gleichgeblieben, geändert haben sich aber im Trend folgende Komponenten:

- **Maschinengestelle**, früher: meist Graugussteile. Es sind heute oft Metall-Reaktionsharz-Beton-Gestelle (preisgünstig, gute Dämpfung, gutes Wärmeverhalten) oder geschweißte Gestelle (preisgünstig bei kleinen Stückzahlen).
- **Maschinenantriebe**, früher: Drehstromantriebe mit relativ geringer Leistung (ohne Drehzahlregelung) und mit Drehzahlanpassung über (teure) mechanische Zahnradgetriebe. Heute: hochdynamische, drehzahlgeregelte Drehstrom-synchronantriebe und Drehstromasynchronantriebe mit großer Leistung. Die Bremsenergie wird ins Stromnetz zurückgeliefert und fällt nicht als Verlustwärme an. Die Spindeldrehzahlen reichen für *High Speed Cutting* (HSC) über 30000 min<sup>-1</sup>. Für Vorschubbewegungen verwendet man Linearmotoren (**Bild 1**) mit dem Vorteil extrem hoher Beschleunigungen und sehr hohen Geschwindigkeiten (**Tabelle 1**).
- **Maschinenkinematik**, früher: geschaltete EIN/AUS, VOR/ZURÜCK Bewegungserzeugung und Steuerung nur für geradlinige Bearbeitung mit Vorschubschlitten auf einer Linearführung oder für eine kreisrunde Bearbeitung über die Werkzeugspindel bzw. ein Karussell. Heute sind beliebige räumlich verwundene Konturen und beliebige Freiformflächen herstellbar. Erreicht wird dies mit der gleichzeitigen kontinuierlich sich verändernden und synchronisierten Bewegung von mehreren Maschinenachsen.

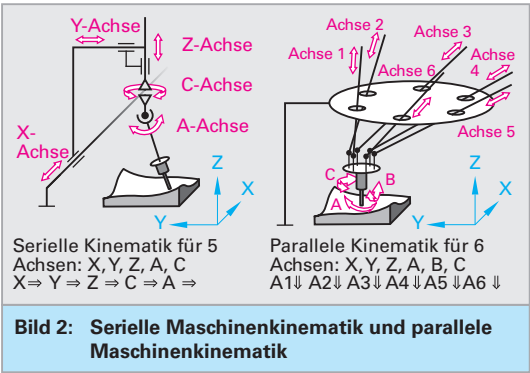
Wie die Maschinenachsen sich bewegen müssen, wird über eine numerische Steuerung mittels Computer (CNC-Technik) erzielt. Zur Bewegungserzeugung nämlich der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück unterscheidet man die übliche *serielle Kinematik* und die neuartige *Parallelkinematik* (**Bild 2**).



**Bild 1: Linearmotor als Direktantrieb für einen Maschinentisch**

Tabelle 1: Linearmotor vs. Kugelgewindtrieb (KGT)*		
Vorschubantrieb	Linearmotor	KGT**
Geschwindigkeit	höher (++)	geringer (+)
Beschleunigung/Ruck	höher(++)	geringer (+)
Vorschubkraft	mäßig (-)	hoch (++)
Genauigkeit	besser(+)	schlechter (-)
Verfahrweg	beliebig (++)	bis ca. 4 m (-)
Rückwirkung auf Maschinengestell	stärker (- -)	geringer (+)
Bandbreite/ Kv-Faktor	höher (+)	niederer (-)
Wartung/Service	geringer (++)	höher (-)
Energieeffizienz	schlechter (-)	meist besser (+)
Maschinenkosten	höher (-)	meist niedriger (+)
Engineering/Montage	geringer (+)	höher (-)

\* Vereinfachte und pauschalisierte Darstellung: Die Vorteile des Linearmotors bedingen geringe bewegte Massen, z. B. durch Leichtbauweise bzw. Parallelkinematik.  
\*\* Kugelgewindtrieb mit Drehstromsynchronmotor



**Bild 2: Serielle Maschinenkinematik und parallele Maschinenkinematik**



Bei der seriellen Kinematik sind die Maschinenachsen aufeinanderfolgend angeordnet. Bei der Parallelkinematik tragen alle gemeinsam das Werkzeug.

### • CFK-Komponenten<sup>1</sup>

Werkzeugtragende Maschinenschlitten und Spannfutter werden z.B. mit einem CFK-Basiskörper (**Bild 1**) ausgestattet und werden dadurch bis zu 70% leichter. Daraus resultieren kürzere Prozesszeiten und geringerer Energieverbrauch.

### • 5-Achsen-Mikro-Fräs-Schleif-Maschinen

Mikro-Fräs-Schleifmaschinen werden z.B. in Dentallabors eingesetzt, um Zahnrestaurationen meist aus glaskeramischen Materialien, herzustellen (**Bild 2**). Auch Bearbeitungen von Composites, Zirkonoxid, Wachs, Kunststoffen, Sintermetallen und Metallen sind üblich. Andere Anwendungsbereiche sind Mikrostrukturierungen von Prägeformen und von Gießformen.

Von Mikrofräsmaschinen erwartet man stets sehr hohe Genauigkeiten mit einer Positionsunsicherheit von  $< 5 \mu\text{m}$ . So sind die Wegmesssysteme üblicherweise direktmessend mit Positionsaufösungen (nach der Interpolation) in den 10-nm-Bereichen.

**Aufbau.** Die 5-Achsen-Maschine (**Bild 2**) erlaubt Rundumbearbeitung beliebiger Freiformflächen in einer Aufspannung, z.B. von Zahnkronen, auch mit Hinterschnitten.

Der 2-achsige Miniatur-Dreh-Schwenktisch mit A-Achse ( $\pm 30^\circ$ ) und B-Achse ( $360^\circ$ ) kann Werkstückrohlinge bis etwa 100 mm Durchmesser und etwa 30 mm Dicke aufnehmen. Das Werkzeug wird über 3 lineare Maschinenachsen bewegt (X-Achse, Y-Achse, Z-Achse). Ein Werkzeugmagazin (**Bild 3**) wird als Schublade in den Arbeitsraum eingefügt. Die Werkzeuge werden durch einen Pick-up-Vorgang von der Spindel aufgenommen und gespannt. Die Werkzeugmagazin-Schublade fasst 6 Mikrofräswerkzeuge und/oder Mikroschleifwerkzeuge.

Bei Nassbearbeitung wird eine Wasserwand um den Fräser gebildet (**Bild 4**). Eine Abflusseinrichtung mit Filterung nimmt Spane und Schleifstaub auf. Die Spindel ist eine Hochfrequenzspindel mit der Maximaldrehzahl  $60000 \text{ min}^{-1}$ .

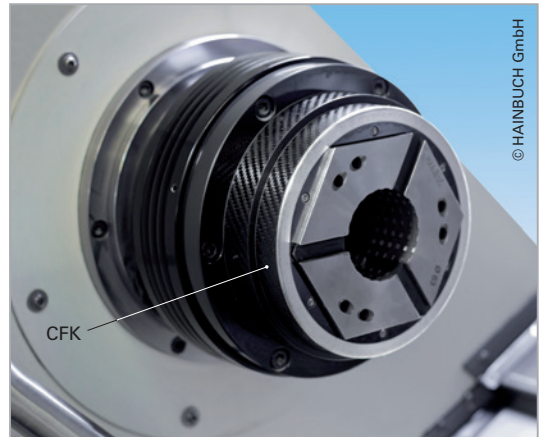


Bild 1: CFK-Spannfutter



Bild 2: Mikrofräsmaschine (Sirona inlab-mc-x5)



Bild 3: Werkzeugmagazin

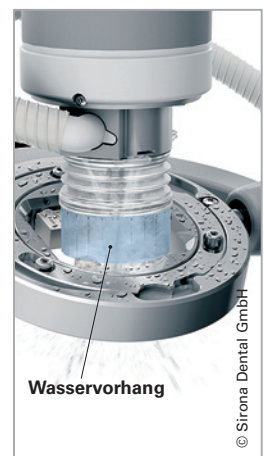


Bild 4: Wasservorhang

<sup>1</sup> CFK von Carbon-Faserverstärktem Kunststoff = kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. CFK gehört zu den faserverstärkten Kunststoffen (FVK), siehe Seite 383. Bei CFK werden Kohlenstofffasern in eine Matrix aus Kunstharz eingebettet. Sie fixiert die Fasern und füllt die Faserzwischenräume.

## 1.5.2 Fertigungsverfahren

### Hartdrehen oder Schleifen

Bei der Herstellung von Bauteilen mit gehärteter Oberfläche ist die übliche Bearbeitungsfolge:

- spanende Bearbeitung im weichen Werkstoffzustand (Weichbearbeitung), dann
- Wärmebehandlung (Härten), dann
- Schleifen und schließlich
- Honen.

Die neue Fertigungsfolge ersetzt das teure Schleifen und Honen. So ergibt sich die Arbeitsfolge:

- Weichbearbeitung,
- Wärmebehandlung,
- Präzisions-Hartdrehen (**Bild 1**).

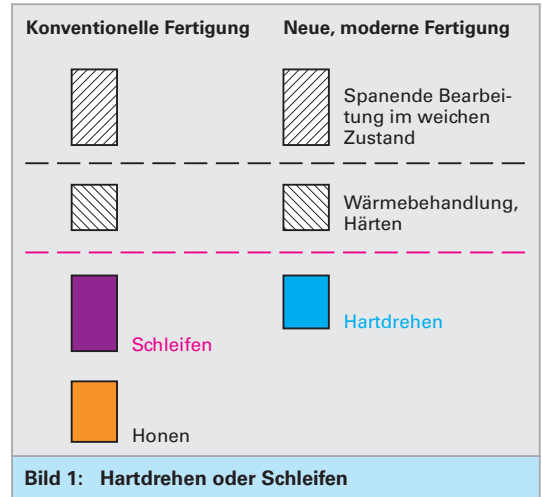
Man erzielt dabei gleichwertige Rauigkeitswerte (z.B. Rautiefe  $R_z = 0,7 \mu\text{m}$  und Mittelrauwert  $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ ) und auch gleichwertige Bauteileigenschaften, z.B. hinsichtlich der Dauerfestigkeit und Schwingfestigkeit. Neue Drehschleifmaschinen ermöglichen auf einer Maschine die Hartbearbeitung durch Drehen oder Schleifen und beides in Kombination (**Bild 1**).

### Hochgeschwindigkeitsfräsen oder Senkerodieren

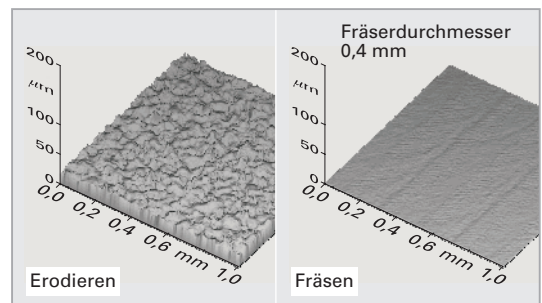
Zur Herstellung von Gesenken und Formen für die Schmiedetechnik, Druckgusstechnik und Spritzgusstechnik sind hochgenaue Formen als Negativformen der zu fertigenden Werkstücke erforderlich. Diese fertigte man oft als Elektroden aus Kupfer oder Graphit in der *Positivform*, um damit durch Senkerodieren die *Negativform* zu erhalten. Dieses Einsenken dauert relativ lange und erfordert eine sehr zeitintensive Oberflächennachbearbeitung. Beim Senkerodieren wird der Werkstoff aufgeschmolzen und entfernt. Dabei bleibt an der Oberfläche ein narbiger Bereich mit Eigenspannungen, der durch Feinschleifen, oft von Hand, abgetragen werden muss.

Die Alternative ist das direkte Fräsen der Form mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten (**Bild 2**) und zum Schlichten mit ganz dünnen Fräsern, z.B.: mit 0,4 mm Durchmesser (**Bild 3**). Man verwendet hierbei meist ein 3-achsiges Fräsen mit 5-achsigen Fräsmaschinen. Dadurch können die Fräser in beliebiger Raumorientierung arbeiten. So ist eine gute Zugänglichkeit auch bei stark zerklüfteten Formen gegeben und die Fräser können kurz eingespannt werden.

Nur bei sehr tiefen, schmalen Kavitäten (Höhlen) ist das Senkerodieren unumgänglich. Dies ist der Fall z.B. bei sehr dünnen Rippen, da dann die Negativform tiefe schmale und steilwandige Schlitz aufweist.



**Bild 2: HSC-Fräsen von Formen**



**Bild 3: Rauigkeit geschichteter Oberflächen (Beispiele)**