



Bibliothek des technischen Wissens

Burkhard Heine
Dietmar Schmid
Michael Dambacher
Fabian Holzwarth
Friedrich Klein

Wolfgang Schäfer
Geert Schellenberg
Manfred Behmel
Matthäus Kaufmann

Uwe Berger
Karl Schekulin
Eckehard Kalhöfer
Rolf Roller
Severin Hannig

Industrielle Fertigung

Fertigungsverfahren, Mess- und Prüftechnik

9., neubearbeitete Auflage

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*

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

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

Rolf Roller, Oberstudienrat, Herbrechtingen: *Formtechnik*

Severin Hannig, Dr.-Ing., Jülich: *Messungen an Werkzeugmaschinen*

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

9. Auflage 2021

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern identisch sind.

ISBN 978-3-8085-5368-8

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

© 2021 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG., 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: PER MEDIEN & MARKETING GmbH, 38102 Braunschweig

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald, unter Verwendung eines Pressefotos der Siemens AG und einer Grafik der planlauf GmbH

Druck: Plump Druck und Medien GmbH, 53619 Rheinbreitbach

Vorwort zur 9. Auflage

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 Fertigungsverfahren sind:

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

Die wichtigsten Felder der Mess- und Prüftechnik sind:

- Fertigungsmesstechnik, Geometrische Produktspezifikation (GPS)
- Werkstoffprüfung
- Maschinen- und Bauteilverhalten
- Messungen an Werkzeugmaschinen

Aufgrund der Dominanz des Metallsektors innerhalb der industriellen Fertigung ist ihm 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.

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 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 Weiterdenken 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“ als Anhang hinzugefügt.

Im Sinne der Allgemeinbildung ist bei den wichtigsten Techniken auf ihre historischen Ursprünge 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 **9. Auflage** gibt es das neue Kapitel **Messungen an Werkzeugmaschinen**. Darin werden die vielfältigen Zusammenhänge zwischen Bearbeitungsqualität und Maschineneigenschaften aufgezeigt sowie Schwachstellen durch Messungen sichtbar gemacht. Des Weiteren wurden **Aktualisierungen in allen Kapiteln** vorgenommen. Besonders hervorzuheben sind: das Prüfen der Schmelze, die Herstellung von Metallpulvern, die Gestaltung der FVK-Bauteile, die Erweiterung bei den Fügeverfahren und die Prüfverfahren für Umgebungseinflüsse. Die neue Norm **DIN EN ISO 6892-1:2017** „Metallische Werkstoffe – Zugversuch“ wurde in Bildern und Formeln eingearbeitet.

In der **EUROPATHEK** (siehe vordere Umschlaginnenseite) stehen eine Reihe von digitalen **Zusatzmaterialien** zur Verfügung: ein Repetitorium zum schrittweisen Studieren und zur Lernkontrolle ganzer Wissensgebiete sowie wichtige Gesetzestexte und Vorschriften.

Wenn Sie mithelfen möchten, dieses Buch für die kommenden Auflagen zu verbessern, schreiben Sie uns unter lektorat@europa-lehrmittel.de. Ihre Hinweise und Verbesserungsvorschläge nehmen wir gern auf.

Inhaltsverzeichnis

Fertigungsverfahren

1 Einführung in die industrielle Fertigungstechnik 9

1.1	Fertigungstechnik als eine Triebfeder der Menschheit.....	9
1.2	Die Fertigungsverfahren im Überblick.....	11
1.3	Entwicklungsphasen der industriellen Technik.....	14
1.4	Industrie 4.0.....	16
1.5	Aktuelle Ziele und Entwicklungen.....	18
1.5.1	Werkzeugmaschinen.....	18
1.5.2	Fertigungsverfahren.....	20
1.5.3	Leichtbau.....	22
1.5.4	Energieeffizienz und Ressourceneffizienz.....	23
1.6	Geschwindigkeit und Qualität.....	24
1.7	Management.....	26
1.7.1	Produktdatenmanagement (PDM).....	26
1.7.2	ERP.....	26
1.7.3	Manufacturing-Execution-Systeme – MES.....	27
1.7.4	Lieferketten-Management.....	28

2 Fertigen mit Metallen 29

2.1	Gießereitechnik.....	29
2.1.1	Gegossene Bauteile.....	29
2.1.2	Geschichtliche Entwicklung.....	32
2.1.3	Begriffe, Bezeichnungen.....	37
2.1.3.1	Unterscheidung nach Werkstoffen.....	37
2.1.3.2	Unterscheidung nach mechanischen Eigenschaften.....	37
2.1.3.3	Unterscheidung nach Gießverfahren.....	38
2.1.3.4	Art der Formfüllung.....	39
2.1.3.5	Art des Vergießens.....	40
2.1.3.6	Prüfen der Schmelze.....	41
2.1.4	Gusswerkstoffe.....	42
2.1.5	Gießverfahren.....	46
2.1.5.1	Sandgießverfahren.....	46
2.1.5.2	Schwerkraftkokillengießen.....	48
2.1.5.3	Niederdruckkokillengießen.....	49
2.1.5.4	Schleudergießen.....	49
2.1.5.5	Feingießen.....	50
2.1.5.6	Druckgießen.....	51
2.1.5.7	Weitere Gießverfahren.....	55
2.1.5.8	Vergleich der Gießverfahren.....	56
2.1.6	Formtechnik.....	58
2.1.6.1	Übersicht.....	58
2.1.6.2	Grundlagen.....	59
2.1.6.3	Modellarten.....	61
2.1.6.4	Handformen.....	62
2.1.6.5	Maschinenformen.....	64
2.1.6.6	Formanlagen.....	67
2.1.6.7	Kerne.....	68
2.1.6.8	Direkte Herstellung von Formen und Kernen.....	70
2.1.6.9	Formstoffe.....	71
2.1.7	Anforderungen an Gussteile und Fertigungsbedingungen.....	72
2.1.7.1	Einleitung.....	72
2.1.7.2	Vollständigkeit.....	72
2.1.7.3	Vermeiden von Kaltfließstellen.....	73
2.1.7.4	Vermeiden innerer Hohlräume.....	74
2.1.7.5	Maßhaltigkeit.....	75
2.1.7.6	Maßbeständigkeit.....	76
2.1.7.7	Korrosionsfestigkeit.....	77
2.1.7.8	Oberflächenbeschaffenheit.....	77
2.1.8	Eigenschaften metallischer Werkstoffe.....	78
2.1.8.1	Volumeneigenschaften.....	78
2.1.8.2	Werkstoffkennwerte im Vergleich.....	80

2.1.8.3	Die Längenausdehnung.....	81
2.1.8.4	Eigenschaftsänderungen beim Übergang flüssig – fest.....	81
2.1.8.5	Dichte bei Legierungen.....	81
2.1.8.6	Aufteilen des Volumendefizits.....	82
2.1.8.7	Entstehen eines Innendefizits.....	82
2.1.8.8	Entstehen von Luft- und Gaseinschlüssen bei der Formfüllung.....	84
2.1.8.9	Entstehen von Spannungen und Rissen.....	86
2.1.8.10	Schwindung der Gussteile in festem Zustand.....	87
2.1.8.11	Thermische Eigenschaften der Gießwerkstoffe.....	89
2.1.9	Wärmeabfuhr an Formen.....	92
2.1.9.1	Wärmeübergang von der Schmelze zur Form.....	92
2.1.9.2	Wärmebilanz einer Form.....	92
2.1.9.3	Wärmedurchgangszahl.....	93
2.1.9.4	Schichten.....	94
2.1.9.5	Abkühlkurven für Gussteile.....	94
2.1.9.6	Kontakttemperatur in der Grenzfläche von Schmelze/Gussteil zur Form.....	95
2.1.9.7	Wärmefluss im System Schmelze/Gussteil zur Form.....	96
2.1.9.8	Wärmeleitung in einem Körper und Bildung der Randschale.....	96
2.1.9.9	Ermittlung der Erstarrungszeit.....	97
2.1.9.10	Der Erstarrungsmodul.....	98
2.1.10	Speisertechnik.....	99
2.1.10.1	Art der Speiser.....	99
2.1.10.2	Position und Geometrie der Speiser.....	100
2.1.10.3	Formstoff zum Abformen der Speiser.....	100
2.1.10.4	Anforderungen an Speiser.....	102
2.1.10.5	Metallostatischer Druck.....	103
2.1.10.6	Abtrennen der Speiser.....	104
2.1.10.7	Abhängigkeit des Speisungsvolumens von thermischen Verhältnissen.....	105
2.1.10.8	Belüftung innenliegender Speiser.....	105
2.1.11	Formfüllvorgänge.....	106
2.1.12	Strömungsvorgänge der Schmelze.....	109
2.1.12.1	Schwerkraftgießen.....	109
2.1.12.2	Druckgießen.....	110
2.1.12.3	Schleudergießen.....	110
2.1.12.4	Aufbau eines Gießsystems.....	110
2.1.12.5	Staufüllung und Strahlfüllung.....	113
2.1.13	Simulation der Formfüllung.....	114
2.2	Pulvermetallurgie (PM).....	115
2.2.1	Metallpulver.....	115
2.2.2	Die Herstellung pulvermetallurgischer Werkstücke.....	117
2.2.2.1	Aufbereiten der Metallpulver.....	117
2.2.2.2	Pressen der Grünlinge.....	118
2.2.2.3	Sintern.....	120
2.2.2.4	Nachbehandlung.....	122
2.2.3	Pulverspritzgießen.....	123
2.2.4	Sinterwerkstoffe und Sinterwerkstücke.....	124
2.2.5	Gestaltung.....	124
2.3	Galvanische Verfahren.....	125
2.3.1	Galvanoformung.....	125
2.3.2	Lithographie-Galvanik-Abformung (LIGA).....	125
2.4	Umformtechnik.....	126
2.4.1	Übersicht.....	126
2.4.2	Geschichtliche Entwicklung.....	128
2.4.3	Metallkundliche Grundlagen.....	129
2.4.4	Druckformen.....	133
2.4.4.1	Warmwalzen.....	133
2.4.4.2	Der Vorgang des Walzens.....	133
2.4.4.3	Walzverfahren.....	135
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
2.5	Spanloses Trennen und Abtragen.....	169	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).....	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.....	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
2.6	Zerspantechnik.....	189	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.....	338
2.6.3.3	Legierter Stahl.....	222	2.6.19.4	Sägemaschinen.....	341
2.6.3.4	Nichtrostende Stähle.....	223	2.6.20	Werkstückspanntechnik.....	342
2.6.3.5	Gusseisenwerkstoffe.....	224	2.6.20.1	Mechanische Spannsysteme.....	343
2.6.3.6	Schwer zerspanbare Werkstoffe.....	225	2.6.20.2	Hydraulische und pneumatische Spann- systeme.....	344
2.6.3.7	Graphit.....	225	2.6.20.3	Vakuum-Spannsysteme.....	345
2.6.3.8	Aluminium-Legierungen.....	226	2.6.20.4	Magnetspanntechnik.....	347
2.6.3.9	Kunststoffe.....	227	2.6.20.5	Gefrierspanntechnik.....	347
2.6.3.10	Verbundwerkstoffe (Composites).....	227	2.7	Wärmebehandlung von Stahl.....	350
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			

3 Fertigung mit Nichtmetallen	357		
3.1 Produkte aus Kunststoffen	357		
3.1.1 Kunststoffe	357	4.1.3 Umformen, Urformen und Füllen	449
3.1.1.1 Einteilung und Arten	357	4.1.3.1 Umformen	449
3.1.1.2 Bauteilgestaltung	363	4.1.3.2 Urformen	452
3.1.2 Fertigungsverfahren	364	4.1.3.3 Füllen	453
3.1.2.1 Extrudieren	365	4.1.4 Textiles Fügen	454
3.1.2.2 Folienblasen	367	4.1.4.1 Fügen zur Herstellung von Rohware	454
3.1.2.3 Kalandrieren	368	4.1.4.2 Fügen zur Herstellung von Fertigprodukten	456
3.1.2.4 Spritzgießen	369	4.1.5 Stoffschlüssiges Fügen	459
3.1.2.5 Varianten des Spritzgießens	375	4.1.5.1 Fügetechniken in einer Übersicht	459
3.1.2.6 Simulation des Spritzgießprozesses	377	4.1.5.2 Schweißen von Metallen	460
3.1.2.7 Hohlkörperblasen (Blasformen)	380	4.1.5.3 Pressschweißverfahren	462
3.1.2.8 Schäumen	381	4.1.5.4 Schmelzschweißverfahren	473
3.1.2.9 Thermoformen	382	4.1.5.5 Schweißen polymerer Werkstoffe	488
3.2 Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)	383	4.1.5.6 Löten	490
3.2.1 Einteilung und Arten	384	4.1.5.7 Kleben	496
3.2.2 Bauteilgestaltung	386	4.2 Oberflächenmodifikation von Bauteilen	501
3.2.3 FVK-Fertigungsverfahren	389	4.2.1 Vorbehandlung	501
3.2.3.1 Warmpressen	389	4.2.1.1 Entfernen von Belägen	502
3.2.3.2 Faserspritzen	391	4.2.1.2 Aktivierung von Oberflächen	504
3.2.3.3 Handlaminieren	392	4.2.1.3 Glätten von Oberflächen	505
3.2.3.4 Resin Transfer Molding (RTM) (Harzinjektionsverfahren)	393	4.2.1.4 Eigenspannungen	505
3.2.3.5 Vakuuminfusion	394	4.2.1.5 Aufrauen von Oberflächen	506
3.2.3.6 Faserwickeln	395	4.2.2 Oberflächenmodifikation	507
3.2.3.7 Prepreg-Techniken	396	4.2.2.1 Modifikation durch Diffusion	508
3.3 Produkte aus Keramik	397	4.2.2.2 Modifikation unter Verwendung eines flüssigen Elektrolyten	509
3.3.1 Einführung und geschichtliche Entwicklung	397	4.2.2.3 Modifikation unter Verwendung des schmelzflüssig oder gelöst vorliegenden Schichtwerkstoffs	514
3.3.2 Bauteile aus Silikatkeramik	399	4.2.2.4 Beschichten aus der Gas- oder Dampfphase	522
3.3.2.1 Rohstoffe	399	4.2.3 Nachbehandlung	526
3.3.2.2 Aufbereitung	401	4.2.3.1 Reduzierung des gelösten Wasserstoffs	526
3.3.2.3 Formgebung	402	4.2.3.2 Konservieren	526
3.3.2.4 Zwischenbearbeitung	402	4.2.4 Entfernen von Schichten	527
3.3.2.5 Sintern	403	4.2.5 Thermisches Entgraten (TEM)	528
3.3.2.6 Oberflächenmodifikation	406	4.3 Montagetechnik	529
3.3.3 Produkte aus Nichtsilikatkeramik	406	4.3.1 Grundlagen	529
3.3.3.1 Gewinnung der Rohstoffe	408	4.3.2 Der Materialfluss	532
3.3.3.2 Aufbereitung	412	4.3.2.1 Lagern	532
3.3.3.3 Formgebung	415	4.3.2.2 Puffern	533
3.3.3.4 Zwischenbearbeitung	418	4.3.2.3 Bunkern	534
3.3.3.5 Hochtemperaturbehandlung	420	4.3.2.4 Magazinieren	535
3.3.3.6 Endbearbeitung	427	4.3.2.5 Fördern	536
3.4 Produkte aus Silikatglas	428	4.3.3 Montagearbeitsplätze	539
3.4.1 Geschichte der Silikatgläser	428	4.3.3.1 Manuelle Montage	539
3.4.2 Silikatgläser heute	430	4.3.3.2 Maschinelle Montage	542
3.4.3 Rohstoffe und Aufbereitung	431	4.3.3.3 Montage 4.0	543
3.4.3.1 Rohstoffe	431	4.3.4 Montageplanung	544
3.4.3.2 Aufbereitung	432		
3.4.4 Schmelzen und Raffinieren	433		
3.4.4.1 Schmelzen	433		
3.4.4.2 Raffinieren	434		
3.4.5 Urformgebung	434		
3.4.5.1 Urformgebung unter Schwerkraft	435		
3.4.5.2 Urformgebung unter Druckanwendung	436		
3.4.5.3 Temperung	438		
3.4.5.4 Urformen durch Pulvertechnologie	439		
3.4.6 Spanlose Formgebung	439		
3.4.7 Spanabhebende Formgebung	440		
3.4.8 Fügen	440		
3.4.9 Oberflächenmodifikation	440		
4 Fügen, Modifizieren und Montieren	443		
4.1 Fügen	443		
4.1.1 Übersicht	443		
4.1.2 Zusammensetzen, Anpressen und Einpressen	444		
4.1.2.1 Zusammensetzen	444		
4.1.2.2 Anpressen und Einpressen	445		
		5 Roboter im Fertigungsprozess	545
		5.1 Einführung zur Robotertechnik	545
		5.2 Einteilung	546
		5.3 Kinematischer Aufbau	547
		5.4 Roboterprogrammierung	551
		5.5 Koordinatensysteme	554
		5.6 Robotersensorführung	555
		5.7 Bearbeitungsaufgaben	557
		6 Laser in der Fertigungstechnik	559
		6.1 Grundlagen zur Lasertechnik	559
		6.1.1 Wichtige Laserarten zur Bearbeitung	559
		6.1.2 Physikalische Grundlagen	560
		6.1.3 Aufbau von Laserstrahlquellen	561
		6.1.4 Betriebs- und Wartungskosten	564
		6.1.5 Strahlführung zum Bearbeitungsort	564
		6.1.5.1 Strahlführung zum Lichtleitkabel (LLK)	564
		6.1.5.2 Strahlführung als Freistrah	566
		6.1.5.3 Welding-on-the-fly	566

6.1.6	Strahlformung am Bearbeitungsort.....	567	8.4.6.1	Messschieber.....	647
6.1.7	Strahlqualität.....	568	8.4.6.2	Messschrauben.....	648
6.2	Werkstückbearbeitung.....	570	8.4.6.3	Messuhren.....	650
6.2.1	Grundlagen.....	570	8.4.6.4	Messtaster mit Inkrementalmaßstab.....	651
6.2.1.1	Fokussierung.....	570	8.4.6.5	Feinzeiger.....	651
6.2.1.2	Verschmutzungsschutz.....	571	8.3.6.6	Fühlhebelmessgeräte.....	652
6.2.1.3	Absorption.....	572	8.4.6.7	Winkelmessgeräte.....	653
6.2.2	Laseranwendungen.....	573	8.4.6.8	Neigungsmessgeräte.....	653
6.2.2.1	Laserschweißen.....	573	8.4.6.9	Autokollimationsfernrohr (AKF).....	655
6.2.2.2	Laserschneiden.....	577	8.4.7	Längenmessgeräte.....	659
6.2.2.3	Laserbohren.....	579	8.4.7.1	Induktive und kapazitive Messtaster.....	659
6.2.2.4	Laserlöten.....	580	8.4.7.2	Trägerfrequenzverstärker.....	662
6.2.2.5	Laserbearbeiten von Diamantwerkzeugen.....	580	8.4.7.3	Pneumatische Wegaufnehmer.....	663
6.2.2.6	Laserbeschriften und Laserstrukturieren.....	581	8.4.7.4	Optische Wegaufnehmer.....	663
6.2.2.7	Laserhärten.....	582	8.4.8	Messtechnische Hilfsmittel.....	666
6.2.2.8	Laserbeschichten.....	582	8.4.9	Messgeräte.....	667
7	3D-Druck (Additive Fertigung, AM).....	583	8.4.9.1	Messmikroskop und Profilprojektor.....	667
7.1	Allgemeines.....	583	8.4.9.2	Komparator.....	669
7.2	Ziele.....	583	8.4.10	Mehrstellenmessgeräte.....	671
7.3	AM-Verfahren.....	586	8.4.11	Laserscanner.....	672
7.3.1	Stereolithographie (STL).....	588	8.4.12	Formmessgeräte.....	672
7.3.2	Lasersintern (LS).....	592	8.4.12.1	Formmessgeräte für runde Teile.....	673
7.3.3	Fused Layer Modeling (FLM).....	597	8.4.12.2	Geradheitsmessgeräte.....	674
7.3.4	Material-Jetting und Binder-Jetting.....	598	8.5	Interferometrische Messverfahren.....	675
7.3.5	Bioplotter, Herstellung medizinischer Implantate.....	600	8.5.1	Grundlagen.....	675
7.4	Rapid Manufacturing (RM).....	601	8.5.1.1	Aufbau von Interferometern zur Wegmessung.....	675
Mess- und Prüftechnik.....			8.5.1.2	Strahlungsquellen.....	677
8	Fertigungsmesstechnik.....	603	8.5.2	Einflüsse auf die Messunsicherheit.....	677
8.1	Grundlagen der geometrischen Messtechnik.....	603	8.5.3	Anwendungen der längenmessenden Interferometrie.....	678
8.1.1	Messabweichungen.....	605	8.5.3.1	Kippwinkelmessung.....	679
8.1.1.1	Ordnung von Messabweichungen.....	606	8.5.3.2	Geradheitsmessung.....	679
8.1.1.2	Messabweichungen durch geometrische Einflüsse.....	607	8.5.3.3	Ebenheitsmessung.....	680
8.1.1.3	Verformungen durch Eigengewicht, Messkraft, Spannkraft.....	612	8.5.4	Formprüfung.....	680
8.1.1.4	Temperatureinfluss.....	616	8.6	Oberflächenmesstechnik.....	681
8.1.1.5	Abweichungen durch Schwingungen.....	618	8.6.1	Mechanische Oberflächenmessung.....	681
8.2	Die Geometrische Produktspezifikation (GPS).....	620	8.6.2	Berührungslose Oberflächenmessung.....	683
8.2.1	Das Konzept zur Tolerierung von Bauteilen.....	620	8.6.2.1	Optische Oberflächenmesstechnik.....	683
8.2.2	GPS-Grundnormen.....	622	8.6.2.2	Weißlichtinterferometer.....	683
8.2.3	Elementare Grundsätze des GPS-System – Das Prinzip des „Aufrufens“.....	623	8.6.2.3	Streulichtmessungen.....	683
8.2.4	Maße und Ausgleichsgeometrien.....	625	8.6.3	Rastersondenmikroskope.....	684
8.3	Maßverkörperungen.....	631	8.6.3.1	Rasterkraftmikroskop (AFM – Atomic Force Microscope).....	684
8.3.1	Endmaße.....	631	8.6.3.2	Rastertunnelmikroskop (STM – Scanning Tunnel Microscope).....	685
8.3.1.1	Parallelendmaße.....	631	8.6.4	Oberflächenkenngrößen.....	685
8.3.2	Maßstäbe und Drehgeber.....	633	8.7	Koordinatenmesstechnik.....	687
8.3.2.1	Strichmaße.....	633	8.7.1	Koordinatenmessgeräte.....	687
8.3.2.2	Inkrementalmaßstäbe.....	633	8.7.2	Aufbau und Wirkungsweise.....	688
8.3.2.3	Absolutmaßstäbe.....	637	8.7.3	Bauarten.....	689
8.4	Form- und Lagebestimmung.....	638	8.7.4	Messsysteme.....	689
8.4.1	Gerade.....	638	8.7.5	Messkopfsysteme.....	690
8.4.2	Ebene.....	640	8.7.6	Zusatzausstattungen.....	692
8.4.2.1	Messplatten.....	640	8.7.7	Steuerungen und Antriebe.....	693
8.4.2.2	Ebenheitsprüfung.....	641	8.7.8	Messwertverarbeitung und Messwertauswertung.....	693
8.4.3	Kreis, Zylinder.....	642	8.7.9	Tastelementkalibrierung.....	696
8.4.4	Winkelverkörperungen.....	643	8.7.10	Durchführung eines Messauftrags.....	696
8.4.4.1	Rechter Winkel.....	643	8.8	Röntgen-Computertomographie (CT).....	701
8.4.4.2	Beliebige Winkel.....	644	8.8.1	Funktionsweise.....	701
8.4.5	Lehren.....	645	8.8.2	Anwendungen.....	702
8.4.6	Anzeigende Messgeräte.....	647	8.9	Messen und Prüfen durch Bildverarbeitung.....	703
			8.9.1	Grundlagen.....	704
			8.9.2	Szenenbeleuchtung.....	707
			8.9.3	2D-Bildverarbeitung.....	710
			8.9.4	3D-Bildaufnahme und Digitalisierung.....	715
			8.9.5	Laser-Trackingsysteme.....	718

9	Werkstoffprüfung	719
9.1	Einführung	719
9.2	Chemische Zusammensetzung	720
9.3	Innere Werkstofftrennungen	723
9.3.1	Penetrationsverfahren	723
9.3.2	Wirbelstromverfahren	724
9.3.3	Streuflussverfahren	725
9.3.4	Durchstrahlung	727
9.3.5	Durchschallung	729
9.4	Härteprüfung	732
9.4.1	Quasistatische Eindringhärteprüfverfahren	733
9.4.2	Dynamische Härteprüfverfahren	744
9.5	Gefüge	746
9.5.1	Lichtmikroskopische Darstellung	746
9.5.2	Elektronenmikroskopische Darstellung	751
9.6	Mechanische Eigenschaften	753
9.6.1	Zugversuch	753
9.6.2	Druckversuch	760
9.6.3	Torsionsversuch	761
9.6.4	Scherversuch	762
9.6.5	Kerbschlagbiegeversuch	763
9.6.6	Schwingfestigkeitsversuch	765
9.6.7	Bruchmechanik	772
9.6.8	Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung	777
10	Maschinen- und Bauteilverhalten	781
10.1	Bauteilprüfung	781
10.1.1	Kennwerte für Werkstoffe und Bauteile	781
10.1.2	Nachweis der Betriebsfestigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen	783
10.1.2.1	Auswahl schwingbruchgefährdeter Querschnitte	783
10.1.2.2	Experimentelle Beanspruchungsanalyse	783
10.1.2.3	Datenaufbereitung und Zählverfahren	785
10.1.2.4	Festlegung der Versuchslasten	787
10.1.2.5	Prüfstandsversuche	788
10.1.2.6	Serienüberwachung und Qualitätskontrolle	790
10.1.3	Innendruckprüfung	791
10.1.3.1	Pulsationsform	791
10.1.3.2	Prüfmedien	792
10.1.3.3	Prüfeinrichtung	792
10.1.3.4	Versuchsergebnisse	793
10.1.4	Prüfverfahren für Umgebungseinflüsse	795
10.2	Schwingungen von Maschinen und Bauteilen	800
10.2.1	Einführung	800
10.2.2	Eigenfrequenzen und Eigenformen	801
10.2.3	Modalanalyse	802
10.3	Messungen an Werkzeugmaschinen (WZM)	807
10.3.1	Kraftmessung	807
10.3.2	Verlagerungs- und Verformungsmessung	810
10.3.3	Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmessung	811
10.3.4	Schwingungsmessung und Schwingungsdiagnose	815
10.3.5	Schwingungsformanalyse	818
10.3.6	Fundament- und Geschossdeckenmessung	819
10.3.7	Dynamischer Spindelrundlauf	821
10.3.8	Lang- und Kurzzeitmessung von Temperaturen	821
10.3.9	Geräuschmessung und Geräuschbeurteilung	823
10.4	Abnahme von Werkzeugmaschinen	825
10.4.1	Einleitung und Übersicht	825
10.4.2	Direkte Messungen der Maschineneigenschaften	826
10.4.3	Abnahme- und Prüfwerkstücke	832
10.4.4	Fähigkeitsuntersuchungen	836

Anhang: Kleine Werkstoffkunde		
A 1	Werkstoffe	839
A 1.1	Entwicklungsphasen	839
A 1.2	Eigenschaften der Konstruktionswerkstoffe	841
A 1.2.1	Einleitung	841
A 1.2.2	Dichte	841
A 1.2.3	Elastizitätsmodul und Bruchzähigkeit	842
A 1.2.4	Versagensspannung	843
A 1.2.5	Wärmeleitfähigkeit	844
A 1.2.6	Temperaturleitfähigkeit	845
A 1.2.7	Verlustfaktor	846
A 1.2.8	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	847
A 1.2.9	Zusammenfassung	848
A 2	Atomaufbau und Bindungstypen	849
A 2.1	Metallbindung	849
A 2.2	Atombindung	850
A 2.3	Ionenbindung	850
A 3	Aufbau metallischer Werkstoffe	851
A 3.1	Gitteraufbau des Idealkristalls	851
A 3.2	Gitterfehler im Realkristall	853
A 3.2.1	Punktförmige Gitterfehler	853
A 3.2.2	Linienförmige Gitterfehler	855
A 3.2.3	Flächige Gitterfehler	856
A 3.3	Gleichgewichtszustände	858
A 3.3.1	Bei lückenloser Mischkristallreihe	858
A 3.3.2	Unlöslichkeit im festen Zustand	859
A 3.3.3	Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand	859
A 3.3.4	Intermetallische bzw. intermediäre Phase	861
A 3.4	Phasenumwandlungen	862
A 3.4.1	Erstarrung	862
A 3.4.2	Umwandlungen im festen Zustand	867
A 4	Eigenschaften metallischer Werkstoffe	869
A 4.1	Thermische Leitfähigkeit	869
A 4.2	Verformung bei nur unbedeutenden Diffusionsprozessen	869
A 4.2.1	Elastische Verformung	869
A 4.2.2	Plastische Verformung	870
A 4.3	Verfestigung	873
A 4.3.1	Verfestigung durch linienförmige Gitterfehler	873
A 4.3.2	Verfestigung durch flächige Gitterfehler	874
A 4.3.3	Verfestigung durch punktförmige Gitterfehler	878
A 4.4	Verfestigungsabbau	878
A 4.4.1	Erholung	878
A 4.4.2	Rekristallisation	879
A 4.5	Plastische Verformung bei Diffusionsprozessen	880
Verzeichnis der Sachworte und Personen		881
Quellenverzeichnis		892

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.

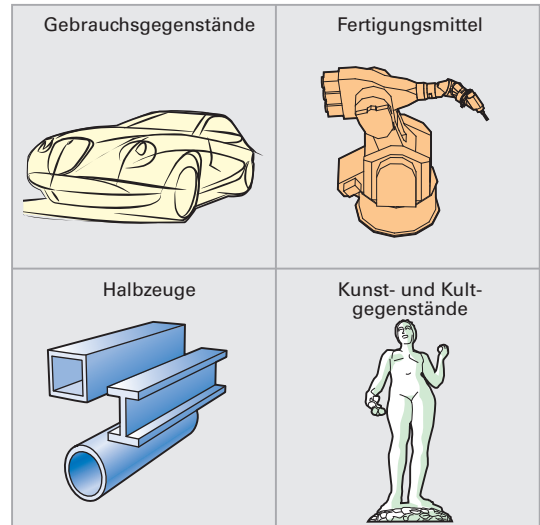


Bild 1: Produkte der Fertigungstechnik

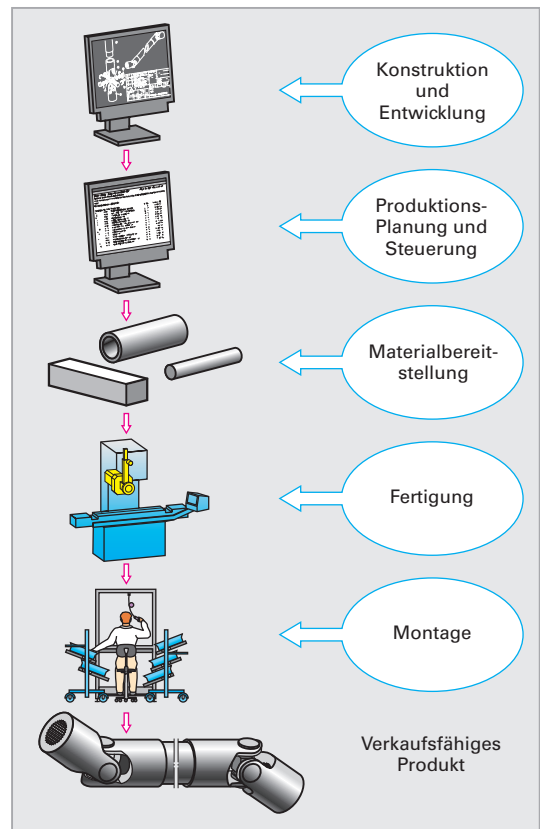


Bild 2: Fertigungsablauf

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. Kennzeichnend ist dabei, wie der Zusammenhalt der stofflichen Bestandteile eines Werkstücks sich darstellt. Durch die Fertigung werden Körper oder Materialien, in der Form verändert oder es werden Stoffeigenschaften verändert. Der Fertigungsprozess überführt Rohteile in Fertigteile.

Man unterscheidet nach DIN 8580 bei den Fertigungsverfahren sechs **Hauptgruppen**, welche das Bauteil dadurch bestimmen, dass der **stoffliche Zusammenhalt**

- (1) **geschaffen** wird, → **Urformen**,
 - (2) **beibehalten** wird → **Umformen**,
 - (3) **vermindert** wird, → **Trennen**,
 - (4) **vermehrt** wird → **Fügen**,
 - (5) **vermehrt** wird → **Beschichten**
- oder dadurch dass
- (6) die **Stoffeigenschaften** verändert werden (**Tabelle 1**).

Die Fertigungsverfahren werden weiter unterteilt in **Gruppen** und in **Untergruppen** unterteilt, siehe folgende Seiten.

Das Fertigen besteht darin, einen Körper oder einen Werkstoff, schrittweise so zu verändern, dass aus dem Rohzustand ein Fertigteil wird. Die einzelnen Arbeitsprozesse können unterschiedlichen Fertigungsverfahren zugeordnet sein.

Im 3D-Druck zum Beispiel baut man durch randgenaues und wiederholtes Beschichten ein Bauteil auf (**Bild 1**). Damit überhängende Bauteilbereiche erstellt werden können erzeugt man in jeder Schicht mitwachsende feingliedrige Stützstrukturen, welche in der Nachbearbeitung dann abgetrennt und ggf. auch verschliffen werden.

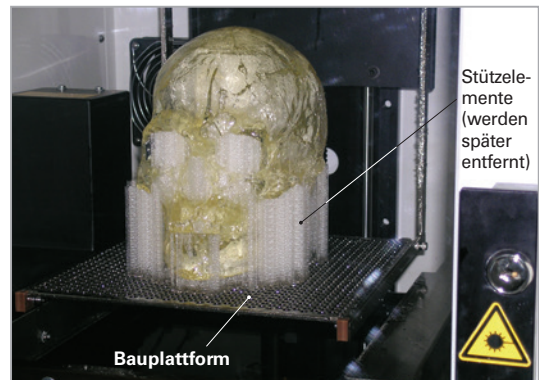


Bild 1: Stereolithographie (Beispiel¹)

Tabelle 1: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren und Beispiele für Untergruppen

1. Urformen ist das Fertigen eines festen Körpers aus einem formlosen Stoff. Man unterscheidet das Urformen aus dem flüssigen, dem plastischen, dem pulverförmigen, dem faserförmigen dem ionisierten Zustand. Die Verfahren sind Gießen, Pressen, Blasformen, Abscheiden und Züchten (z. B. von Kristallen).

2. Umformen ist das Fertigen eines festen Körpers durch bildsames, nämlich plastisches 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.

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 z. B. durch Ineinanderschieben, durch Nieten, durch Verschrauben, durch Ummanteln, durch Schweißen, Löten und Kleben.

5. Beschichten ist Fertigen durch das Aufbringen eines formlosen pulvrigen, flüssigen oder gasförmigen Stoffes auf einen festen Körper. Durch das Beschichten verfolgt man einen Schutz der Werkstücke vor Verschleiß, Korrosion, Hitze oder man erzeugt gewünschte Oberflächenfarben und Oberflächentexturen oder 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.



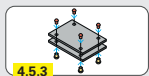
1.1.1



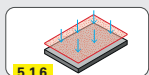
2.1.2



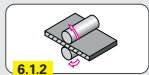
3.1.1



4.5.3



5.1.6



6.1.2

Untergruppen (Beispiele): 1.1.1 Schwerkraftgießen, 2.1.2 Freiformen, 3.1.1 Scherschneiden, 4.5.3 Fügen durch Nieten, 5.1.6 Bedrucken, 6.1.2 Verfestigen durch Walzen

¹ Im Beispiel wird ein Replikat eines steinzeitlichen Schädels hergestellt. Die Daten wurden durch Röntgen-Computer-Tomographie (CT) gewonnen (siehe Seite 701).

Tabelle 1: Urformen (Hauptgruppe 1)

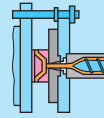
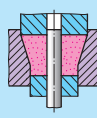
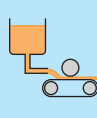
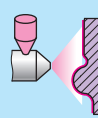
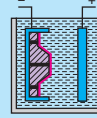
1.1 Aus flüssigem Zustand	1.2 Aus plast. Zustand	1.3 Aus breiigem Zustand	1.4 Aus Körnern od. Pulvern	1.5 Aus Spänen- od. Fasern	1.8 Mit Gas od. Dampf	1.9 Aus ionisiertem Zustand
						
• Schwerkraftgießen • Druckgießen • Schleudern • Stranggießen • Schäumen • Tauchformen	• Press-, Blasformen • Spritzgießen • Spritz- und Strangpressen • Ziehformen • Kalandrieren	• Beton- und Gipsgießen • Porzellan und Keramikgießen	• Pressen • Sandformen • Thermisches Spritzen	• Spanplattenherstellen • Faserplattenherstellen • Papierherstellen	Abscheiden in eine Form	Abscheiden in eine Form (elektrolytisch)

Tabelle 2: Umformen (Hauptgruppe 2)

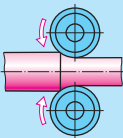
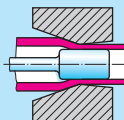
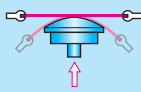
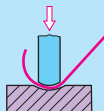
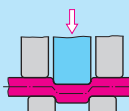
2.1 Druckumformen	2.2 Zugdruckumformen	2.3 Zugumformen	2.4 Biegeumformen	2.5 Schubumformen
				
• Walzen • Freiformen • Gesenkformen • Eindrücken • Druckdrücken • Umformstrahlen • Veredelungsstrahlen	• Durchziehen • Tiefziehen • Drücken • Kragenziehen • Knickbauchen • Innenhochdruck-Weitstauchen	• Längen • Weiten • Tiefen	• Biegeumformen mit Geradliniger Bewegung • Biegeumformen mit drehender Bewegung	• Verschieben mit geradliniger Bewegung • Verschieben mit drehender Bewegung

Tabelle 3: Trennen (Hauptgruppe 3)

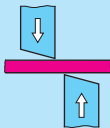
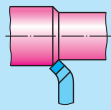
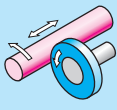
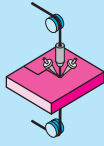
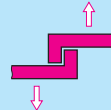
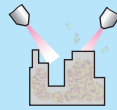
3.1 Zerteilen	3.2 Spanen mit geom. best. Schneiden	3.3 Spanen mit geom. unbest. Schneiden	3.4 Abtragen	3.5 Zerlegen	3.6 Reinigen
					
• Scherschneiden • Messerschneiden • Beißschneiden • Spalten • Reißen • Brechen	• Drehen, Fräsen • Bohren, Senken, Reiben • Hobeln, Stoßen • Räumen • Sägen • Feilen, Raspeln • Bürstenspanen • Schaben, Meißeln	• Schleifen mit Rotierendem Werkzeug • Bandschleifen • Hubschleifen • Honen • Läppen • Strahlspanen • Gleitspanen	• Thermisches Abtragen • Chemisches Abtragen • Elektrochem. Abtragen	• Auseinandernehmen • Lösen kraftschlüssiger Verbindungen • Zerlegen gefügter Teile • Ablöten	• mechanisch • strömungstechnisch • chemisch • thermisch • mit Lösungsmitteln • durch Strahlen

Tabelle 1: Fügen (Hauptgruppe 4)

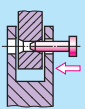
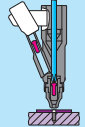
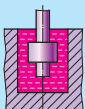
4.1 Zusammen- setzen	4.2 Füllen	4.3 An- und Einpressen	4.4 Ur- formen	4.5 Um- formen	4.6 Schwei- ßen	4.7 Löten	4.8 Kleben
							
• Auflegen • Aufsetzen • Schichten • Einlegen, • Einsetzen • Einschieben • Einhängen • Einrenken • Einspreizen	• Einfüllen • Tränken, • Imprägnieren	• Schrauben • Klemmen • Klammern • Einpressen • Nageln, • Verstiften	• Ausgießen • Einbetten • Vergießen • Galvanisieren • Ummanteln • Kitten	• Draht Umformen • Blech Umformen • Nieten	• Pressschweißen • Schmelzschweißen	• Weichlöten • Hartlöten	• Kleben Textiles Fügen  • Zwirnen • Stricken • Weben • Nähen

Tabelle 2: Beschichten (Hauptgruppe 5)

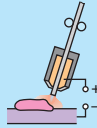
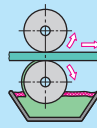
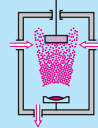
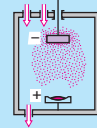
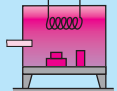
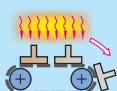
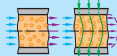
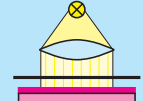
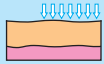
5.1 Aus flüssigem Zustand	5.3 Aus breiigem Zustand	5.4 Mit Körnern oder Pulvern	5.6 Durch Schweißen	5.7 Durch Löten	5.8 Durch Gase oder Dämpfe	5.9 Durch Ionisieren
						
• Schmelztauchen • Lackieren • Färben • Emaillieren • Gießen • Drucken • Beschriften	• Spachteln • Putzen, • Verputzen	• Wirbelsintern • elektrostatisch • Spritzen • thermisch • Spritzen	• Schmelzauftragsschweißen	• Auftragweichlöten • Auftraghartlöten	• Vakuumbedampfen • Vakuumbestäuben	• galvanisch • chemisch

Tabelle 3: Stoffeigenschaft ändern (Hauptgruppe 6)

6.1 Verfestigen durch Umformen	6.2 Wärme- behandeln	6.3 Thermomech. Behandeln	6.4 Sintern, Brennen	6.5 Magnetisie- ren	6.7 Photoche- misch Behandeln
					 • Belichten
• mech. Strahlen • Walzen • Ziehen • Schmieden	• Glühen • Härten • Isotherm. Umwandeln • Anlassen • Vergüten • Tiefkühlen • Thermochem. Behandeln	• Austenitformhärten • Heißisostatisches Pressen	• Ausgießen • Einbetten • Vergießen • Eingalvanisieren • Ummanteln • Kitten	6.6 Bestrahlen  • Laserstrahlen • Molekularstrahlen • Thermostrahlen • Ionenstrahlen	

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)

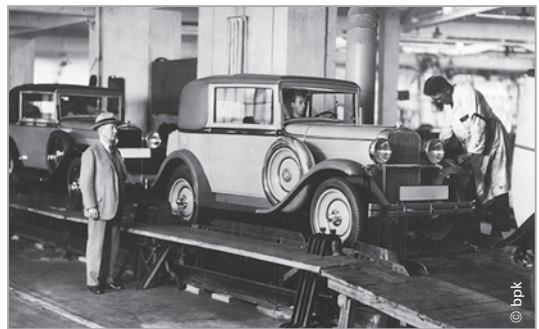


Bild 2: Der 10000. Opel läuft vom Band (1931)

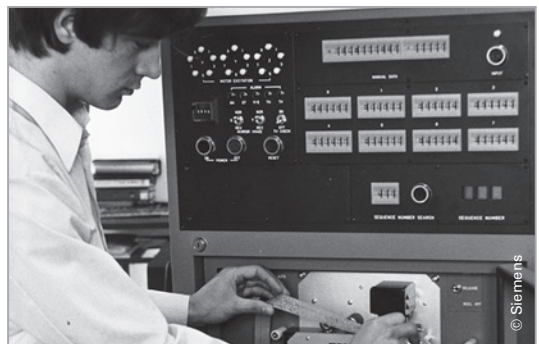


Bild 3: NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)

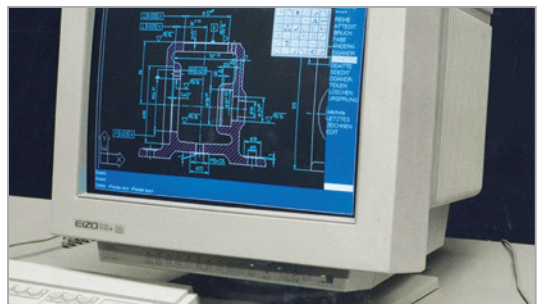


Bild 4: 2D-CAD-System (1998)

Vierte industrielle Revolution: Internet

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

Das Internet¹, 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

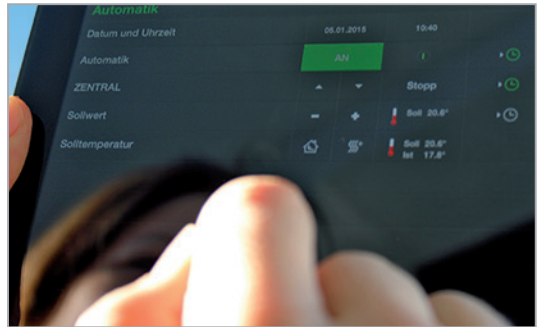


Bild 1: Temperatursteuerung über ein Smartphone

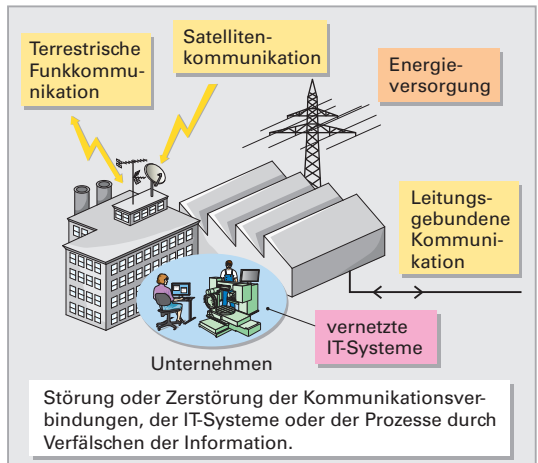


Bild 2: Gefahren im IT-Bereich

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*² (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.

¹ Internet von engl. internetwork = Zwischen Netzwerk, miteinander verbundene Netze

² engl. malware, Kunstwort aus engl. malicious = bösartig und software

1.4 Industrie 4.0

Mit **Industrie 4.0** wird der Start in die **vierte industrielle Revolution** benannt. Auslöser war das Zukunftsprojekt *Industrie 4.0* der deutschen Bundesregierung mit dem die informationstechnische Vernetzung insbesondere der Produktionstechnik vorangetrieben wird.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 18.08.2014 (Zitat): Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 zielt darauf ab, die deutsche Industrie in die Lage zu versetzen, für die Zukunft der Produktion gerüstet zu sein. Industrieproduktion wird gekennzeichnet sein durch starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien-) Produktion, die weitgehende Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse und die Verkopplung von Produktion und hochwertige Dienstleistungen.

Die Wirtschaft steht an der Schwelle zur vierten industriellen Revolution. Durch das Internet getrieben, wachsen reale und virtuelle Welt immer weiter zu einem Internet der Dinge zusammen. Die Kennzeichen der zukünftigen Form der Industrieproduktion sind die starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien-) Produktion, die weitgehende Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse und die Verkopplung von Produktion und hochwertigen Dienstleistungen, die in sogenannten hybriden Produkten mündet. Die deutsche Industrie hat jetzt die Chance, die vierte industrielle Revolution aktiv mitzugestalten. Mit dem Zukunftsprojekt Industrie 4.0 wollen wir diesen Prozess unterstützen.

Ziel von Industrie 4.0 sind intelligente (smarte¹) Fabriken. Diese zeichnen sich aus durch:

- Wandlungsfähigkeit, • Ergonomie und
- Ressourceneffizienz, • Kundenorientierung.

Die heute übliche Produktionsplanung und -steuerung mit der Vorgabe von Arbeitsschritten könnte abgelöst werden in dem z. B. die Werkstücke, die Abläufe selbst organisieren. Rohlinge, Fabrikate und Produkte werden „intelligent“. Sie machen sich ihre Prozesse selbst.

Die Produkte sind mit speicherfähigen RFIDs² versehen (**Bild 1**) oder tragen zumindest eingeprägte Codes (**Bild 2**) zur Kennung. Die Produktionsmittel und Logistikkomponenten sind als „embedded³ systems“, konzipiert (**Bild 2**) und prinzipiell internetfähig.

Embedded Systems sind Produkte mit integrierten (eingebetteten) Computern bzw. Mikrocomputern oder Mikroprozessoren (**Bild 3**) zum Zweck der Steuerung, Regelung, Visualisierung bzw. allgemein zur Automatisierung.

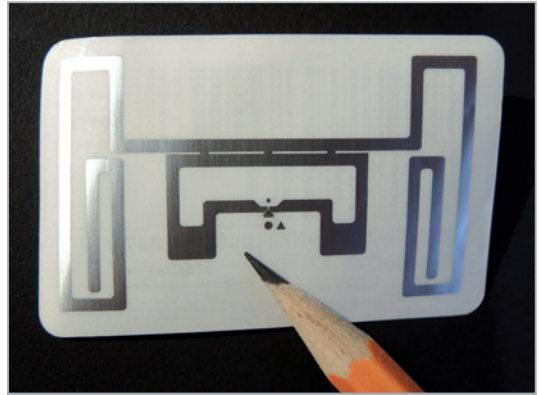


Bild 1: RFID-Folie



Bild 2: Matrix-Code auf Gussteil

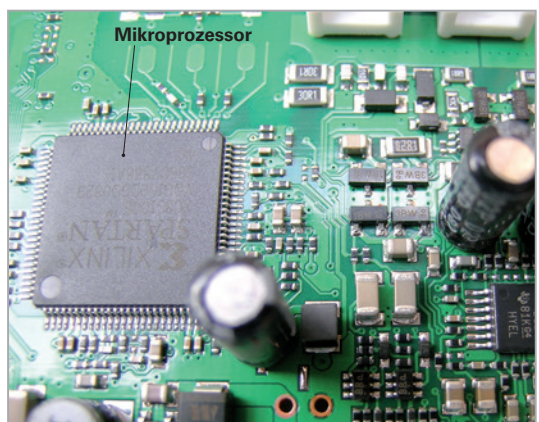


Bild 3: Embedded Systems zur Automatisierung

¹ engl. smart = geschickt

² engl. radio-frequency identification = drahtlose Identifizierung mithilfe elektromagnetischer Wellen

³ engl. embedded = eingebettet

Cyber-Physische-Systeme (CPS)

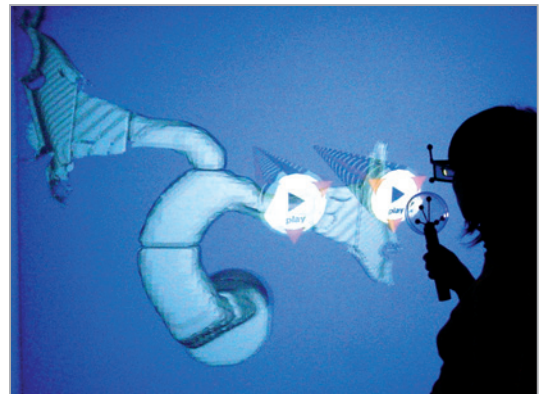
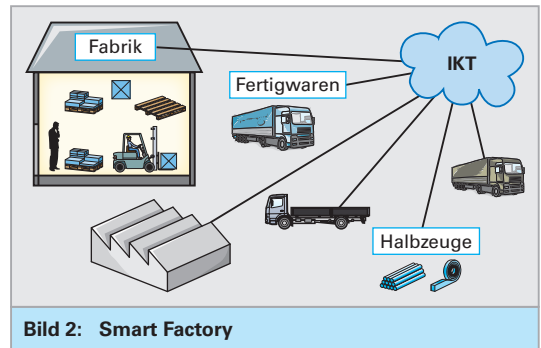
Eine zunehmende Bedeutung haben die **Cyber-Physical-Systems**¹ (CPS). Sie ermöglichen durch eine angehängte Kommunikationstechnik die Vernetzung von eingebetteten Systemen untereinander und mit dem Internet. Dabei wird die frühere hierarchische und lokal konzentrierte Struktur aufgelöst (**Bild 1**).

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.:

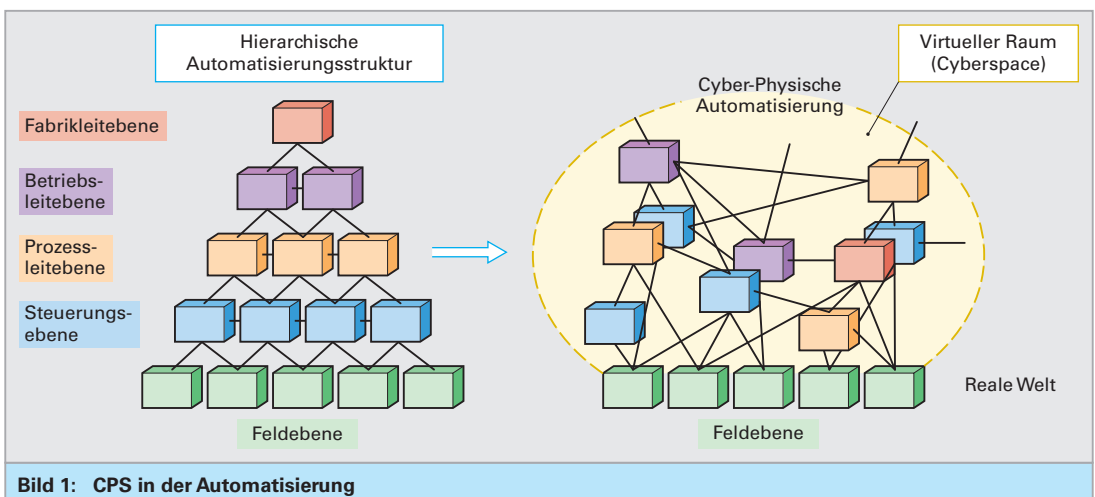
Smart Factory²: Mit IKT (Informations- und Kommunikationstechnik) vernetzte Unternehmen, Maschinen, Anlagen, Zulieferer und Logistiker, um auf Kundenwünsche schnell und flexibel reagieren zu können (**Bild 2**).

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.



¹ 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.

² 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⁻¹. 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**).

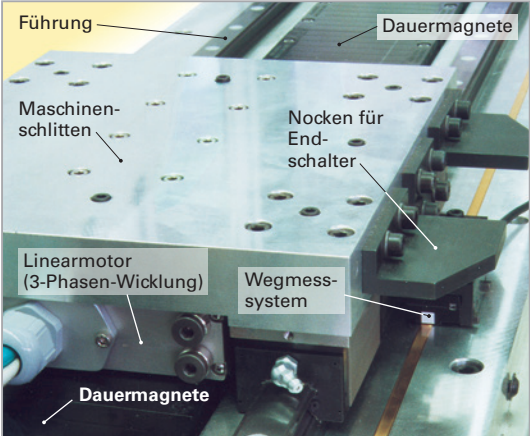


Bild 1: Linearmotor als Direktantrieb für einen Maschinentisch

Tabelle 1: Linearmotor vs. Kugelgewindetrieb (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.
** Kugelgewindetrieb mit Drehstromsynchronmotor

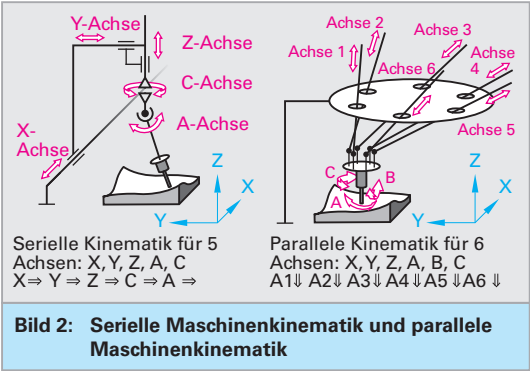


Bild 2: Serielle Maschinenkinematik und parallele Maschinenkinematik

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

• CFK-Komponenten¹

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°) 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 $60\,000 \text{ min}^{-1}$.

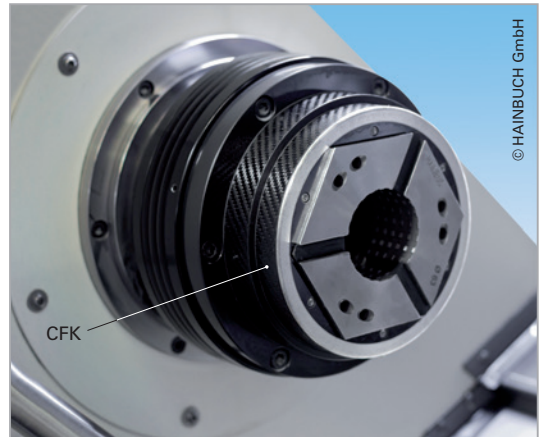


Bild 1: CFK-Spannfutter



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



Bild 3: Werkzeugmagazin

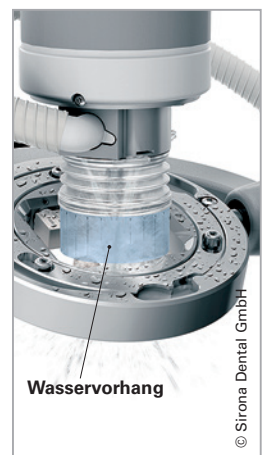


Bild 4: Wasservorhang

¹ 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.

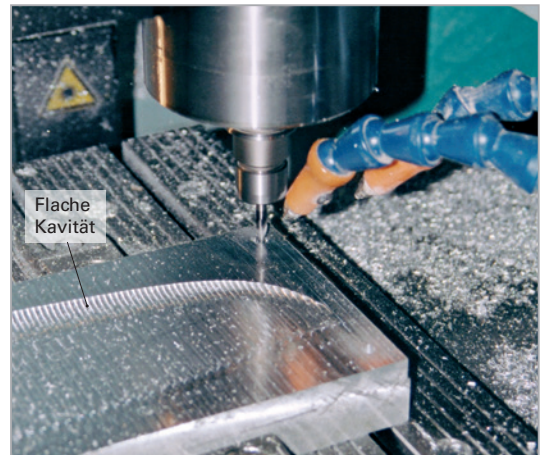
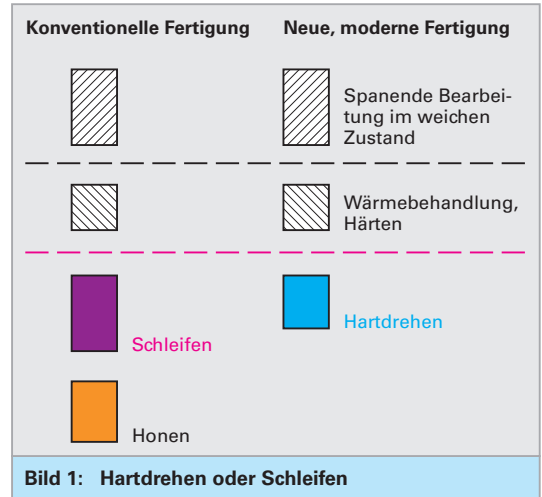


Bild 2: HSC-Fräsen von Formen

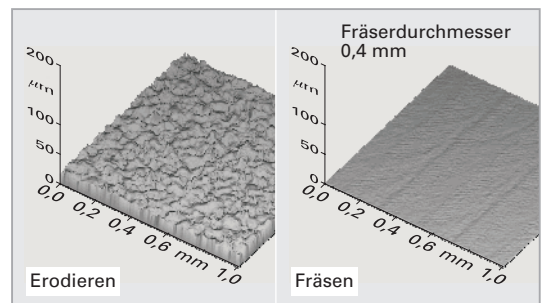


Bild 3: Rauigkeit geschichteter Oberflächen (Beispiele)