



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

Ekkehard Kalhöfer

Rolf Roller

Industrielle Fertigung

Fertigungsverfahren, Mess- und Prüftechnik

8., neubearbeitete Auflage, mit CD

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger 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

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 Zerspanetechnik 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 gerne mitgeteilt werden.

Inhaltsverzeichnis

Fertigungsverfahren

1 Einführung in die industrielle Fertigungstechnik	9	2.1.8.3	Die Längenausdehnung	81
1.1 Fertigungstechnik als eine Triebfeder der Menschheit	9	2.1.8.4	Eigenschaftsänderungen beim Übergang flüssig – fest	81
1.2 Die Fertigungsverfahren im Überblick	11	2.1.8.5	Dichte bei Legierungen	81
1.3 Entwicklungsphasen der industriellen Technik	14	2.1.8.6	Aufteilen des Volumendefizits	82
1.4 Industrie 4.0	16	2.1.8.7	Entstehen eines Innendefizits	82
1.5 Aktuelle Ziele und Entwicklungen	18	2.1.8.8	Entstehen von Luft- und Gaseinschlüssen bei der Formfüllung	84
1.5.1 Werkzeugmaschinen	18	2.1.8.9	Entstehen von Spannungen und Rissen	86
1.5.2 Fertigungsverfahren	20	2.1.8.10	Schwindung der Gussteile in festem Zustand	87
1.5.3 Leichtbau	22	2.1.8.11	Thermische Eigenschaften der Gießwerkstoffe	89
1.5.4 Energieeffizienz und Ressourceneffizienz	23	2.1.9	Wärmeabfuhr an Formen	92
1.6 Geschwindigkeit und Qualität	24	2.1.9.1	Wärmeübergang von der Schmelze zur Form	92
1.7 Management	26	2.1.9.2	Wärmebilanz einer Form	92
1.7.1 Produktdatenmanagement (PDM)	26	2.1.9.3	Wärmedurchgangszahl	93
1.7.2 ERP	26	2.1.9.4	Schlüchten	94
1.7.3 Manufacturing-Execution-Systeme – MES	27	2.1.9.5	Abkühlkurven für Gussteile	94
1.7.4 Supply Chain Management (SMC)	28	2.1.9.6	Kontaktempерatur in der Grenzfläche von Schmelze/Gussteil zur Form	95
2 Fertigen mit Metallen	29	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	2.2	Pulvermetallurgie (PM)	115
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	2.3	Galvanische Verfahren	125
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	2.4	Umformtechnik	126
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	Wärmswalzen	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	Fräswerfahren	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 Fräswerfahren	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 ¹)	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	Kühlsmierung	291
2.5.2.3	Trennen mit Plasma ¹	177	2.6.12.1	Kühlsmierstoffe (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	Schleifarbeiten	300
2.6	Zerspanungstechnik	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 (Schleifmitteltörnung)	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	2.7	Wärmebehandlung von Stahl	350
2.6.3.10	Bearbeitung harter Eisenwerkstoffe	228	2.7.1	Durchhärtten	350
2.6.4	Drehen	230	2.7.2	Oberflächenhärteten	353
2.6.4.1	Allgemeines	230	2.7.2.1	Oberflächenhärteten durch Wärmebehandlung	353
2.6.4.2	Schnittgrößen beim Drehen	231	2.7.2.2	Härteten 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 Fertigen mit Nichtmetallen	357
3.1 Produkte aus Kunststoffen	357
3.1.1 Kunststoffe	357
3.1.1.1 Einteilung und Arten	357
3.1.1.2 Bauteilgestaltung	363
3.1.2 Fertigungsverfahren	364
3.1.2.1 Extrudieren ¹	365
3.1.2.2 Folienblasen	367
3.1.2.3 Kalandrieren	368
3.1.2.4 Spritzgießen	369
3.1.2.5 Varianten des Spritzgießens	375
3.1.2.6 Simulation des Spritzgießprozesses	377
3.1.2.7 Hohlkörperblasen (Blasformen)	380
3.1.2.8 Schäumen	381
3.1.2.9 Thermoformen	382
3.2 Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)	383
3.2.1 Einteilung und Arten	384
3.2.2 Bauteilgestaltung	386
3.2.3 FVK-Fertigungsverfahren	389
3.2.3.1 Warmpressen	389
3.2.3.2 Faserspritzen	391
3.2.3.3 Handlaminieren	392
3.2.3.4 Resin Transfer Molding (RTM) (Harzinjektionsverfahren)	393
3.2.3.5 Vakuuminfusion	394
3.2.3.6 Faserwickeln	395
3.2.3.7 Prepreg-Techniken	396
3.3 Produkte aus Keramik	397
3.3.1 Einführung und geschichtliche Entwicklung	397
3.3.2 Bauteile aus Silikatkeramik	399
3.3.2.1 Rohstoffe	399
3.3.2.2 Aufbereitung	401
3.3.2.3 Formgebung	402
3.3.2.4 Zwischenbearbeitung	402
3.3.2.5 Sintern	403
3.3.2.6 Oberflächenmodifikation	406
3.3.3 Produkte aus Nichtsilikatkeramik	406
3.3.3.1 Gewinnung der Rohstoffe	408
3.3.3.2 Aufbereitung	412
3.3.3.3 Formgebung	415
3.3.3.4 Zwischenbearbeitung	418
3.3.3.5 Hochtemperaturbehandlung	420
3.3.3.6 Endbearbeitung	427
3.4 Produkte aus Silikatglas	428
3.4.1 Geschichte der Silikatgläser	428
3.4.2 Silikatgläser heute	430
3.4.3 Rohstoffe und Aufbereitung	431
3.4.3.1 Rohstoffe	431
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
3.3.5.4 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 Stoffschlüssiges Fügen	443
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
4.1.3 Schweißen polymerer Werkstoffe	472
4.1.4 Löten	474
4.1.4.1 Werkstoffkundliche Aspekte I	475
4.1.4.2 Lötprozess	478
4.1.4.3 Werkstoffkundliche Aspekte II	478
4.1.5 Kleben	480
4.1.5.1 Werkstoffkundliche Aspekte	481
4.1.5.2 Bindemechanismen innerhalb der Klebstoffschiht	482
4.2 Oberflächenmodifikation von Bauteilen	485
Vorbehandlung	485
Entfernen von Belägen	486
Aktivierung von Oberflächen	488
Glätten von Oberflächen	489
Eigenspannungen	489
Aufrauen von Oberflächen	490
Oberflächenmodifikation	491
Modifikation durch Diffusion	492
Modifikation unter Verwendung eines flüssigen Elektrolyten	493
Modifikation unter Verwendung des schmelzflüssig oder gelöst vorliegenden Schichtwerkstoffs	498
Beschichten aus der Gas- oder Dampfphase	506
Nachbehandlung	510
Reduzierung des gelösten Wasserstoffs	510
Konservieren	510
Entfernen von Schichten	511
Thermisches Entgraten (TEM)	512
4.3 Montagetechnik	513
Grundlagen	513
Der Materialfluss	516
Lagern	516
Puffern	517
Bunkern	518
Magazinieren	519
Fördern	520
Fügearbeiten	523
Fügestrukturen	523
Fügeverfahren	523
Montagearbeitsplätze	529
Manuelle Montage	529
Maschinelle Montage	532
Montage 4.0	533
Montageplanung	534
5 Roboter im Fertigungsprozess	535
5.1 Einführung zur Robotertechnik	535
5.2 Einteilung	536
5.3 Kinematischer Aufbau	537
5.4 Roboterprogrammierung	541
5.5 Koordinatensysteme	544
5.6 Robotersensorführung	545
5.7 Bearbeitungsaufgaben	547
6 Laser in der Fertigungstechnik	549
6.1 Grundlagen zur Lasertechnik	549
Wichtige Laserarten zur Bearbeitung	549
Physikalische Grundlagen	550
Aufbau von Laserstrahlquellen	551
Betriebs- und Wartungskosten	554
Strahlführung zum Bearbeitungsort	554
Strahlführung mit Lichtleitkabel (LLK)	554
Strahlführung als Freistrahler	556
Welding-on-the-fly	556
Strahlführung am Bearbeitungsort	557
Strahlqualität	558

6.2	Werkstückbearbeitung	560	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	Autokollimationstfernrohr (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	Laserhärteten	572	8.4.9	Messgeräte.....	657
6.2.2.8	Laserbeschichten	572	8.4.9.1	Messmikroskop und Profilprojektor	657
7	Additive Fertigung (AM)	573	8.4.9.2	Komparator	659
7.1	Allgemeines	573	8.4.10	Mehrstellenmessgeräte	661
7.2	Ziele	573	8.4.11	Laserscanner	662
7.3	AM-Verfahren	576	8.4.12	Formmessgeräte	662
7.3.1	Stereolithographie ¹ (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	8.5	Interferometrische Messverfahren	665
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
7.4	Rapid Manufacturing (RM)	591	8.5.1.2	Strahlungsquellen	667
Mess- und Prüftechnik					
8	Fertigungsmesstechnik	593	8.5.2	Einflüsse auf die Messunsicherheit	667
8.1	Grundlagen der geometrischen Mess- technik	593	8.5.3	Anwendungen der längenmessenden Interferometrie	668
8.1.1	Messabweichungen	595	8.5.3.1	Kippwinkelmessung	669
8.1.1.1	Ordnung von Messabweichungen	596	8.5.3.2	Geradheitsmessung	669
8.1.1.2	Messabweichungen durch geometrische Einflüsse	597	8.5.3.3	Ebenheitsmessung	670
8.1.1.3	Verformungen durch Eigengewicht, Messkraft, Spannkraft	602	8.5.4	Formprüfung	670
8.1.1.4	Temperatureinfluss	606	8.6	Oberflächenmesstechnik	671
8.1.1.5	Abweichungen durch Schwingungen	608	8.6.1	Mechanische Oberflächenmessung	671
8.2	Die Geometrische Produktspezifikation (GPS)	610	8.6.2	Berührungslose Oberflächenmessung	673
8.2.1	Das Konzept zur Tolerierung von Bauteilen	610	8.6.2.1	Optische Oberflächenmesstechnik	673
8.2.2	GPS-Grundnormen	612	8.6.2.2	Weißlichtinterferometer	673
8.2.3	Elementare Grundsätze des GPS-System – Das Prinzip des „Aufrufens“	613	8.5.2.3	Streulichtmessungen	673
8.2.4	Maße und Ausgleichsgeometrien	615	8.6.3	Rastersondenmikroskope	674
8.3	Maßverkörperungen	621	8.6.3.1	Rasterkraftmikroskop (AFM – Atomic Force Microscope)	674
8.3.1	Endmaße	621	8.6.3.2	Rastertunnelmikroskop (STM – Scanning Tunnel Microscope)	675
8.3.1.1	Parallelendmaße	621	8.6.4	Oberflächenkenngrößen	675
8.3.2	Maßstäbe und Drehgeber	623	8.7	Koordinatenmesstechnik	677
8.3.2.1	Strichmaße	623	8.7.1	Einführung	677
8.3.2.2	Inkrementalmaßstäbe	623	8.7.2	Aufbau und Wirkungsweise	678
8.3.2.3	Absolutmaßstäbe	627	8.7.3	Bauarten	679
8.4	Form- und Lagebestimmung	628	8.7.4	Messsysteme	679
8.4.1	Gerade	628	8.7.5	Zusatzausstattungen	682
8.4.2	Ebene	630	8.7.6	Steuerungen und Antriebe	683
8.4.2.1	Messplatten	630	8.7.7	Messwertverarbeitung und Messwert- auswertung	683
8.4.2.2	Ebenheitsprüfung	631	8.7.8	Tastelementkalibrierung	686
8.4.3	Kreis, Zylinder	632	8.7.9	Planung und Durchführung eines Messauf- trags	687
8.4.4	Winkelverkörperungen	633	8.7.10	Messprogrammerstellung	689
8.4.4.1	Rechter Winkel	633	8.8	Röntgen-Computertomographie (CT)	693
8.4.4.2	Beliebige Winkel	634	8.8.1	Funktionsweise	693
8.4.5	Lehren	635	8.8.2	Anlagentechnik	694
8.4.6	Anzeigende Messgeräte	637	8.8.3	Auflösung	696
8.4.6.1	Messschieber	637	8.8.4	Anwendungen	697
8.4.6.2	Messschrauben	638	8.9	Messen und Prüfen durch Bildverarbeitung	700
8.4.6.3	Messuhren	640	8.9.1	Grundlagen	701
			8.9.2	Szenenbeleuchtung	704
			8.9.3	2D-Bildverarbeitung	708
			8.9.4	3D-Bildaufnahme und Digitalisierung	713
			8.9.5	Laser-Trackingsysteme	716

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

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 herzustellenden 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

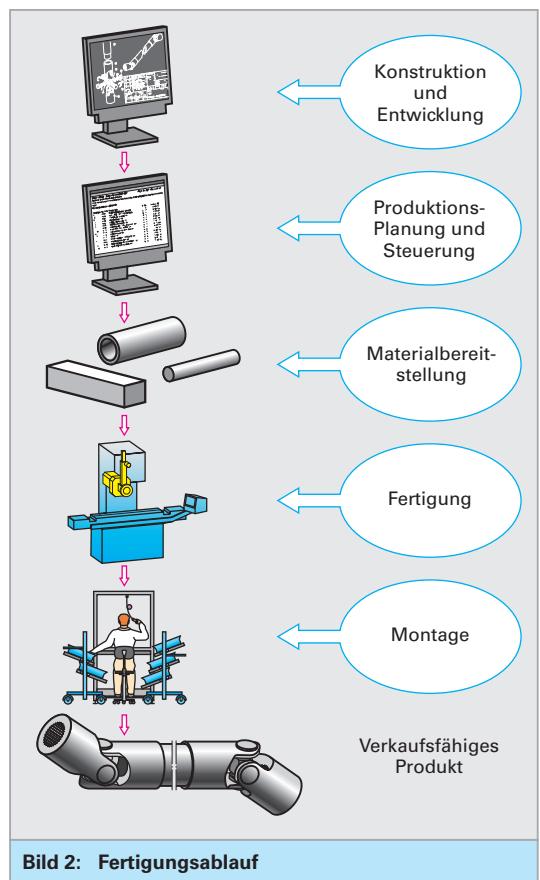


Bild 2: Fertigungsablauf

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 Versorgungen,
- 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. l. 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 ändert¹. Kennzeichnend ist dabei, wie der Zusammenhalt der stofflichen Bestandteile eines Werkstücks sich darstellt¹.

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 Bauteilentstehens 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*² 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 Teilebereiche 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 pulvriegen, 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 Härteln, Vergüten, Magnetisieren, Entkohlen, Dehydrieren, Aufkohlen, Nitrieren.

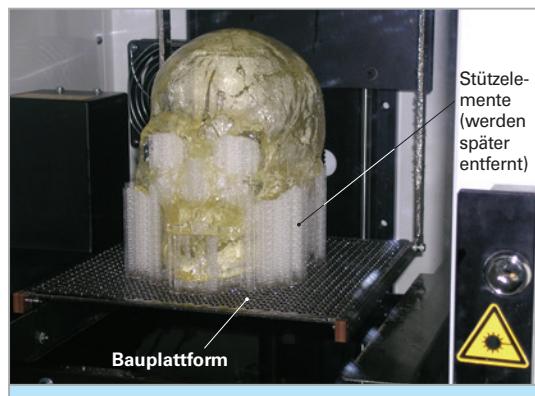


Bild 1: Stereolithographie (Beispiel³)

¹ DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung

² plastisch von griech. plastikos = „zum Gestalten (Formen) gehörig“; Plastik = Kunst des Gestaltens

³ 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)

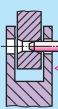
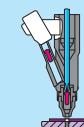
Aus flüssigem Zustand	Aus plast. Zustand	Aus breiigem Zustand	Aus Körnern od. Pulvern	Aus Spänen- od. Fasern	Mit Gas od. Dampf	Aus ionisiertem Zustand
<ul style="list-style-type: none"> • Schwerkraftgießen • Druckgießen • Schleudern • Stranggießen • Schäumen • Tauchformen 	<ul style="list-style-type: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

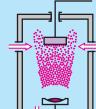
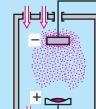
Tabelle 2: Umformen (Hauptgruppe 2)

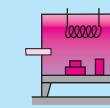
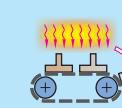
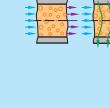
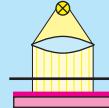
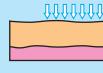
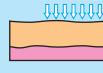
Druckumformen	Zugdruckumformen	Zugumformen	Biegeumformen	Schubumformen
<ul style="list-style-type: none"> • Walzen • Freiformen • Gesenkformen • Eindrücken • Druckdrücken • Umformstrahlen • Oberflächenveredelungsstrahlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Durchziehen • Tiefziehen • Drücken • Kragenziehen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

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"> • Scherschneiden • Messerschneiden • Beißschneiden • Spalten • Reißen • Brechen 	<ul style="list-style-type: none"> • Drehen • Bohren, Senken, Reiben • Fräsen • Hobeln, Stoßen • Räumen • Sägen • Feilen, Rasieren • Bürstenspannen • Schaben, Meißen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schleifen mit Rotierendem Werkzeug • Bandschleifen • Hubschleifen • Honen • Läppen • Strahlspannen • Gleitspannen 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermisches Abtragen • Chemisches Abtragen • Elektrochem. Abtragen 	<ul style="list-style-type: none"> • Auseinandernehmen • Lösen kraftschlüssiger Verbindungen • Zerlegen gefügter Teile • Ablöten 	<ul style="list-style-type: none"> • mechanisch • strömungstechnisch • chemisch • thermisch • mit Lösungsmitteln • durch Strahlen

Zusammen-setzen	Füllen	An- und Einpressen	Urformen	Umformen	Schweißen	Löten	Kleben
							
<ul style="list-style-type: none"> Auflegen Aufsetzen Schichten Einlegen, Einsetzen Einschieben Einhängen Einrenken Einspreizen 	<ul style="list-style-type: none"> Einfüllen Tränken, Imprägnieren 	<ul style="list-style-type: none"> Schrauben Klemmen Klammern Einpres sen Nageln, Verstiften 	<ul style="list-style-type: none"> Ausgießen Einbetten Vergießen Galvani sieren Ummanteln Kitten 	<ul style="list-style-type: none"> Draht Um formen Blech Um formen Nieten 	<ul style="list-style-type: none"> Press schweißen Schmelz schweißen 	<ul style="list-style-type: none"> Weich löten Hartlöten 	<ul style="list-style-type: none"> Kleben physik. abbindend Kleben chem. abbindend

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"> Schmelztauchen Lackieren Färben Emaillieren Gießen Drucken Beschriften 	<ul style="list-style-type: none"> Spachteln Putzen, Verputzen 	<ul style="list-style-type: none"> Wirbelsintern elektrostatisch Spritzen thermisch Spritzen 	<ul style="list-style-type: none"> Schmelzauftragsschweißen 	<ul style="list-style-type: none"> Auftragweichlöten Auftraghartlöten 	<ul style="list-style-type: none"> Vakuumbedampfen Vakuumbestäuben 	<ul style="list-style-type: none"> galvanisch chemisch

Verfestigen durch Umformen	Wärme-behandeln	Thermomech. Behandeln	Sintern, Brennen	Magnetisieren	Photochemisch Behandeln			
								
<ul style="list-style-type: none"> mech. Strahlen Walzen Ziehen Schmieden 	<ul style="list-style-type: none"> Glühen Härt en Isotherm. Umwandeln Anlassen Vergüten Tiefkühlen Thermo-misch Behandeln 	<ul style="list-style-type: none"> Austenitform-härt en Heißisostatisches Pressen 	<ul style="list-style-type: none"> Ausgießen Einbetten Vergießen Eingalvani-sieren Ummanteln Kitten 	Bestrahlen				
				 <ul style="list-style-type: none"> Laserstrahlen Thermostrahlen 				
				 <ul style="list-style-type: none"> Molekularstrahlen 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 serienindustrische 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 Diode 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)

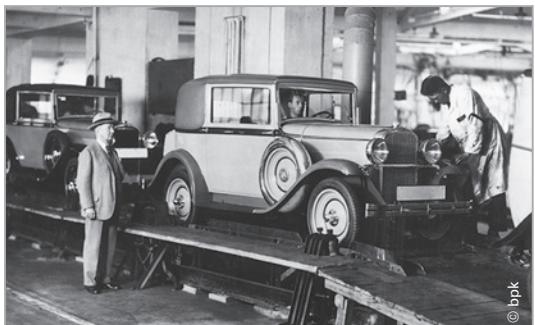


Bild 2: Der 10 000. Opel läuft vom Band (1931)

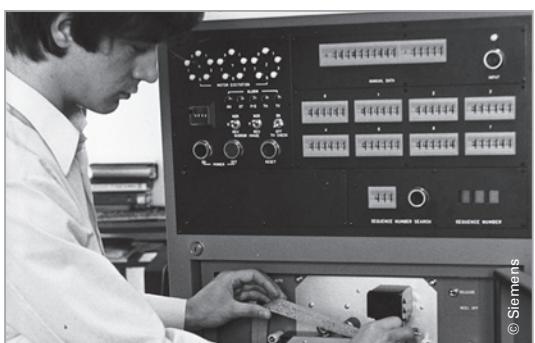


Bild 3: NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)



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 programmisierten 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 zu gehörigen Dienste eingeleitet.

Gefahren bei Industrie 4.0

Steuerungsgeräte von Produktionsmaschinen (SPS) waren lange Zeit eine eigene Welt mit eigner, 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

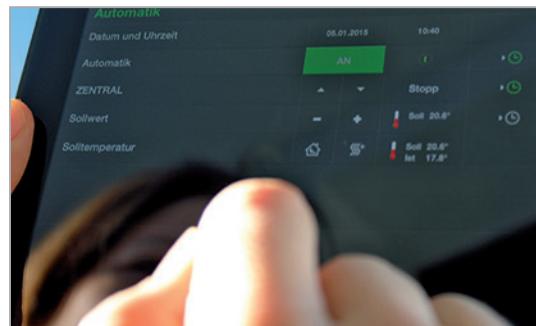


Bild 1: Temperatursteuerung über ein Smartphone

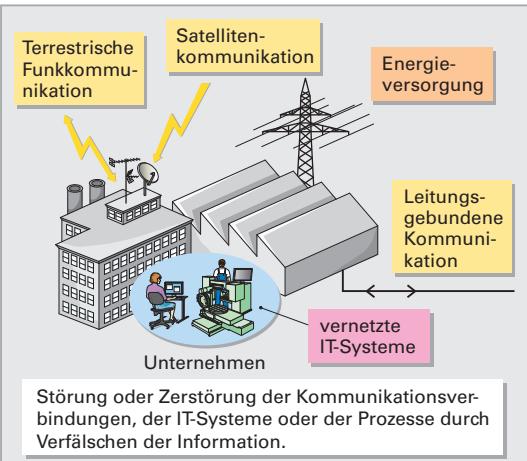


Bild 2: Gefahren im IT-Bereich

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 = Zwischenetzwerk, miteinander verbundene Netze

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

1.4 Industrie 4.0

Industrie 4.0 ist ein Zukunftsprojekt der deutschen Bundesregierung mit dem die informationstechnische Vernetzung insbesondere der Produktions-technik 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,
- Ressourceneffizienz,
- Ergonomie und
- 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 „embedded systems“ konzipiert (**Bild 3**) 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.

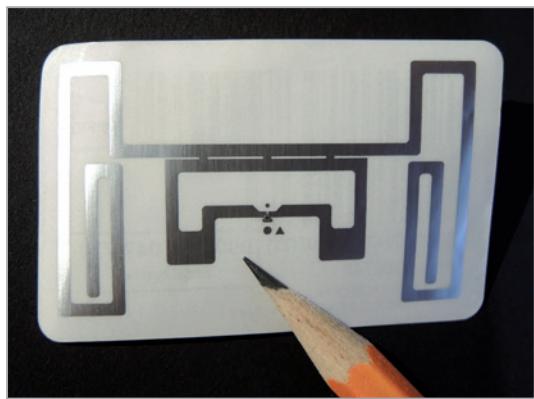


Bild 1: RFID-Folie



Bild 2: Matrix-Code auf Gussteil

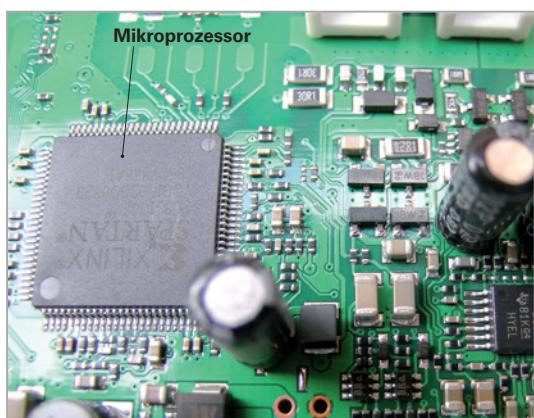


Bild 3: Embedded Systems zur Automatisierung

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-Systems¹ (CPS)**. Sie möglich 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. Fernseheräte.

Die Entwicklungen der Cyber-Physischen 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.

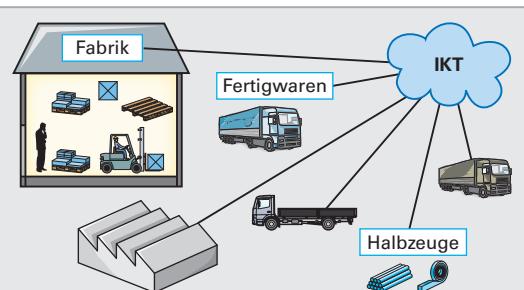


Bild 2: Smart Factory

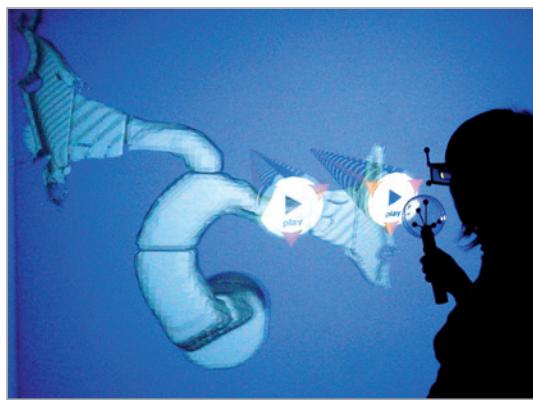


Bild 3: Virtuelles Prüfen des Formfüllvorgangs in einer 3D-Umgebung

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

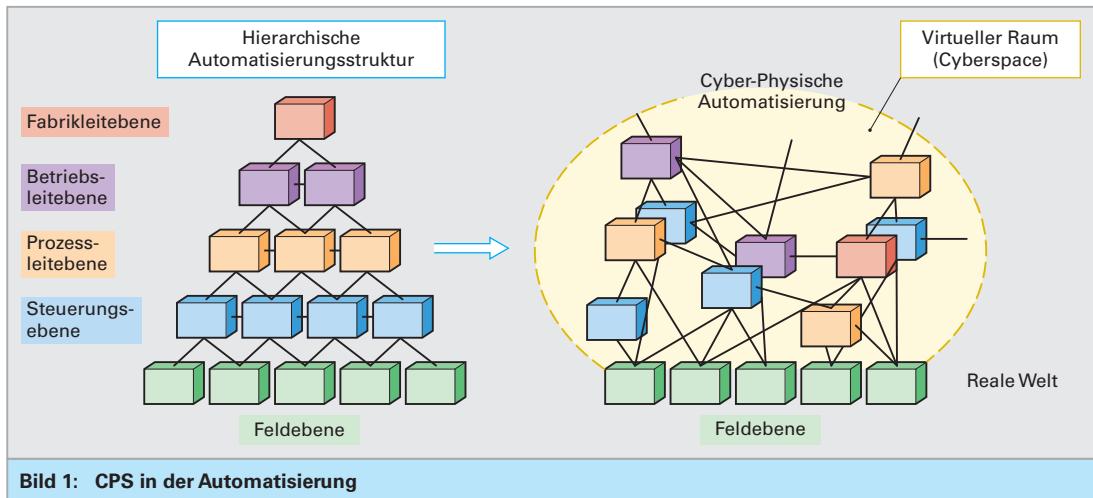


Bild 1: CPS in der Automatisierung

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 Zahnrädergetriebe. Heute: hochdynamische, drehzahlgeregelte Drehstromsynchronantriebe 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 Vorschubsschlitten 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**).

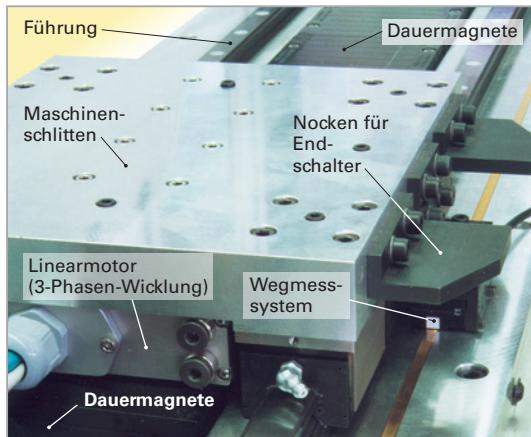


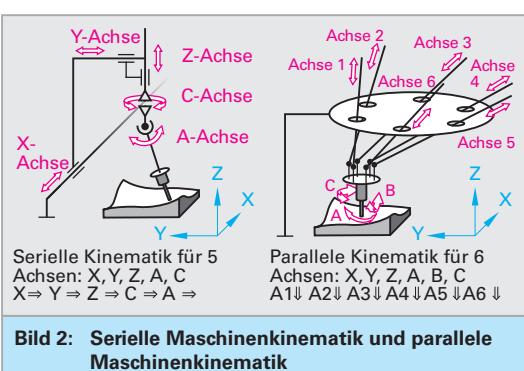
Bild 1: Linearmotor als Direktantrieb für einen Maschinentisch

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 niederer (+)
Engineering/Montage	geringer (+)	höher (-)

* Vereinfachte und pauschalierte Darstellung: Die Vorteile des Linearmotors bedingen geringe bewegte Massen, z.B. durch Leichtbauweise bzw. Parallelkinematik.

** Kugelgewindetrieb mit Drehstromsynchrongenerator



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-Frässchleif-Maschinen**

Mikro-Frässchleifmaschinen werden z.B. in Dentallabors eingesetzt, um Zahnerstellungen 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 µm. So sind die Wegmesssysteme üblicherweise direktmessend mit Positionsauflösungen (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 Zahnräumen, auch mit Hinterschnitten.

Der 2-achsige Miniatur-Dreh-Schwenktisch mit A-Achse ($\pm 30^\circ$) und B-Achse (360°) kann Werkstückröhlinge 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. Das Werkzeugmagazin-Schublade fasst 6 Mikrofräswerkzeuge und/oder Mikroschleifwerkzeuge.

Bei Nassbearbeitung wird eine Wasserwand um den Fräser gebildet (**Bild 4**). Eine Abflusseinrichtung mit Filterung nimmt Späne und Schleifstaub auf. Die Spindel ist eine Hochfrequenzspindel mit der Maximaldrehzahl 60 000 min⁻¹.

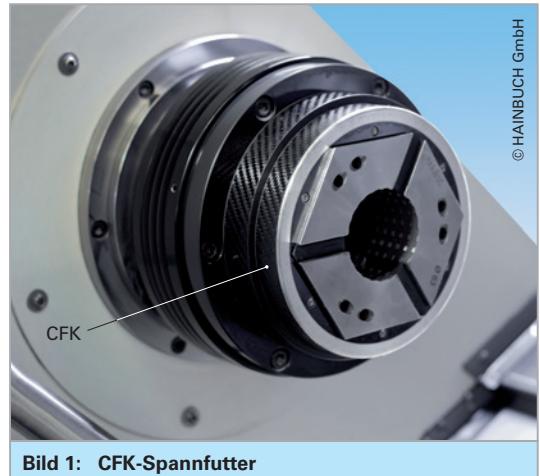


Bild 1: CFK-Spannfutter

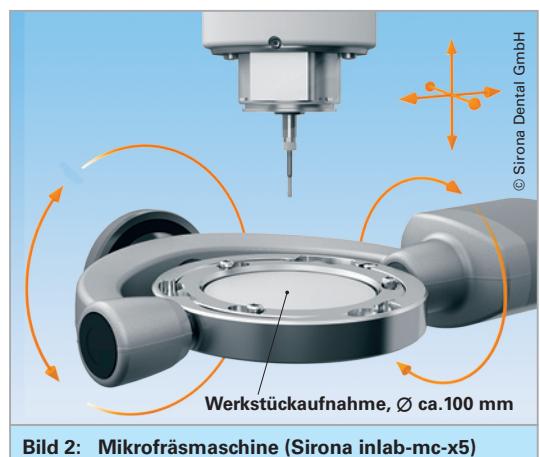


Bild 2: Mikrofräsmaschine (Sirona inlab-mc-x5)

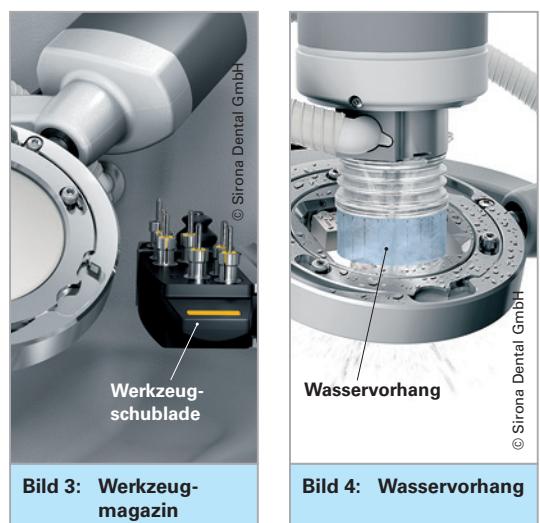


Bild 3: Werkzeugmagazin

Bild 4: Wasservorhang

¹ CFK von Carbon-Faser verstärktem Kunststoff = kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. CFK gehört zu den faserverstärkten Kunststoffen (FVK), siehe Seite 383. Bei CFK werden Kohlenstofffasern in eine Matrix aus Kunsthars 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-Harddrehen (**Bild 1**).

Man erzielt dabei gleichwertige Rauigkeitswerte (z.B. Rautiefe $Rz = 0,7 \mu\text{m}$ und Mittelrauwert $Ra = 0,1 \mu\text{m}$) 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 Schlüchten 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 Schlitze aufweist.

