



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	5 Roboter im Fertigungsprozess	545
3.4.4.1 Schmelzen	433	5.1 Einführung zur Robotertechnik	545
3.4.4.2 Raffinieren	434	5.2 Einteilung	546
3.4.5 Urformgebung	434	5.3 Kinematischer Aufbau	547
3.4.5.1 Urformgebung unter Schwerkraft	435	5.4 Roboterprogrammierung	551
3.4.5.2 Urformgebung unter Druckanwendung	436	5.5 Koordinatensysteme	554
3.4.5.3 Temperung	438	5.6 Robotersensorführung	555
3.4.5.4 Urformen durch Pulvertechnologie	439	5.7 Bearbeitungsaufgaben	557
3.4.6 Spanlose Formgebung	439		
3.4.7 Spanabhebende Formgebung	440	6 Laser in der Fertigungstechnik	559
3.4.8 Fügen	440	6.1 Grundlagen zur Lasertechnik	559
3.4.9 Oberflächenmodifikation	440	6.1.1 Wichtige Laserarten zur Bearbeitung	559
4 Fügen, Modifizieren und Montieren	443	6.1.2 Physikalische Grundlagen	560
4.1 Fügen	443	6.1.3 Aufbau von Laserstrahlquellen	561
4.1.1 Übersicht	443	6.1.4 Betriebs- und Wartungskosten	564
4.1.2 Zusammensetzen, Anpressen und Einpressen	444	6.1.5 Strahlführung zum Bearbeitungsort	564
4.1.2.1 Zusammensetzen	444	6.1.5.1 Strahlführung mit Lichtleitkabel (LLK)	564
4.1.2.2 Anpressen und Einpressen	445	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.

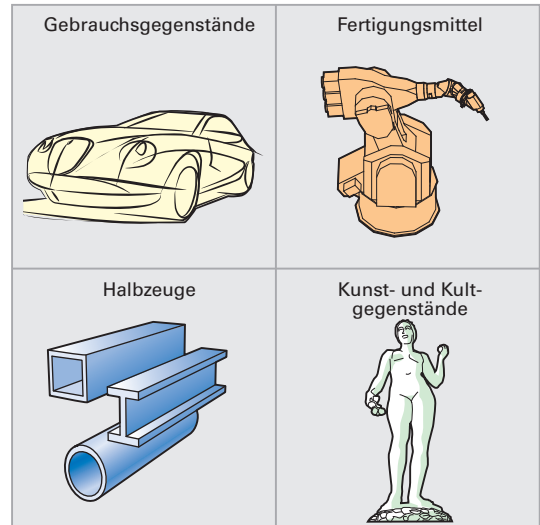


Bild 1: Produkte der Fertigungstechnik

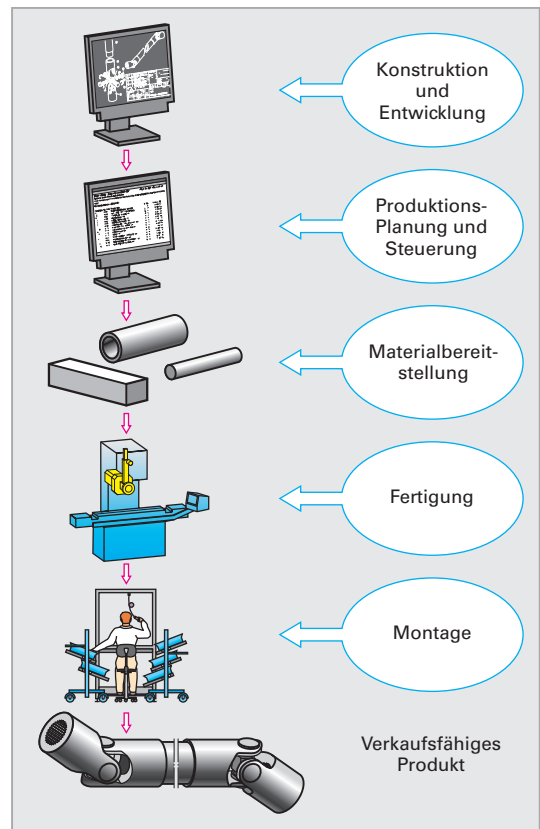


Bild 2: Fertigungsablauf

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