



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Metallberufe

Fachkunde ZERSPANTECHNIK

1. Auflage

Bearbeitet von
Lehrern an beruflichen Schulen und Ingenieuren
unter der Leitung von Michael Dambacher

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

Europa-Nr.: 15655

Die Autoren sind Fachlehrer in der gewerblich-technischen Ausbildung und Ingenieure:

Bergner, Oliver; Dipl.-Berufspädagoge	Dresden
Dambacher, Michael; Dipl.-Ing., StD	Aalen
Gresens, Thomas; Dipl.-Berufspädagoge	Schwerin
Morgner, Dietmar; Dipl.-Ing.-Pädagoge	Chemnitz
Wieneke, Falko; Dipl.-Ing., StD	Essen
Pflug, Alexander; Dipl.-Ing., OStR	Schwäbisch Gmünd
Liesch, Thomas; Dipl.-Ing. (FH), OStR	Westhausen

Leitung des Arbeitskreises und Lektorat:

Michael Dambacher

Bildentwürfe: die Autoren

Fotos: Leihgaben der Firmen (Verzeichnis letzte Seite)

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlages Europa-Lehrmittel, Ostfildern

1. Auflage 2019

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Satz- und Zeichenfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-1565-5

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://europa-lehrmittel.de>

Satz: Satz+Layout Werkstatt Kluth GmbH, 50374 Erftstadt

Umschlag: Grafische Produktion Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlagfoto: Autorenfoto an der Technischen Schule Aalen

Druck: mediaprint solutions GmbH, 33100 Paderborn

Inhaltsverzeichnis

A ARBEITS- UND UMWELTSCHUTZ

A1 GESUNDHEITSSCHUTZ 11

Allgemeine Sicherheitsregeln	11
Warn- und Hinweisschilder	12
Arbeitssicherheit an Werkzeugmaschinen	13
Allgemeine Sicherheitsregeln	13
Arbeitssicherheit beim Drehen und Fräsen	14
Arbeitssicherheit beim Schleifen	15
Arbeitssicherheit beim Bohren	15
Sicheres Arbeiten mit Hebezeugen und Anschlagmitteln	15
Sicherheitsanforderungen an Fertigungssysteme	17
Umgang mit elektrischen Betriebsmitteln und Anlagen	18
Umgang mit Kühlschmiermitteln	20
Brandschutz	24

A2 UMWELTSCHUTZ 25

A3 ERSTE HILFE 27

G GRUNDLAGEN

G1 MECHANIK 29

G2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN 30

Masse, Dichte und Volumen	30
Kraft und Kraftarten	30
Kraftwirkungen	30
Die Gewichtskraft	31
Reibungskraft	32
Gleichförmige Bewegung	33
Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	33
Kraft und Beschleunigung	33
Drehmoment	34
Energie und Arbeit	35
Leistung	36
Wirkungsgrad	36

G3 CHEMISCHE GRUNDLAGEN 37

Metalle	37
Metalllegierungen	38
Mischkristall	38
Kristallgemisch	38

G4 ELEKTROTECHNISCHE GRUNDLAGEN 39

Der elektrische Stromkreis	39
Die elektrische Spannung	39
Der elektrische Strom	40
Der elektrische Widerstand	41
Schaltung von Widerständen	42
Reihenschaltung von Widerständen	42
Parallelschaltung von Widerständen	43
Stromarten	44
Elektrische Leistung und elektrische Arbeit	45
Überstrom-Schutzeinrichtungen	46
Fehler an elektrischen Anlagen	47
Schutzmaßnahmen bei elektrischen Maschinen	48
Hinweise für den Umgang mit Elektrogeräten	50

G5 FESTIGKEITSLHRE 51

Aufgaben und Ziele	51
Grundbelastungsfälle	52
Beanspruchung auf Zug	52
Zugspannung	52
Flächenpressung	53

W WERKSTOFFTECHNIK

W1 EINTEILUNG DER WERKSTOFFE 54

Einteilung und Bezeichnung der Eisenwerkstoffe	54
Stahlerzeugende Industrie	55
Stahlwerkstoffe	56
Gusseisenwerkstoffe	57
Nichteisenmetallwerkstoffe	58

W2 WERKSTOFFPRÜFTECHNIK 59

Werkstoffprüfung metallischer Werkstoff durch zerstörende Prüfverfahren	59
Zugversuch	59
Druckversuch	61
Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy	61
Prüfung der Dauerschwingfestigkeit	61
Härteprüfung	62
Härtevergleichstabelle	63
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	64
Technology of materials	65

Werkstoffprüfung von Kunststoffen	66
Zugprüfung	66
Härteprüfung	66
CHARPY-Prüfung	67
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren	67

W3 WÄRMEBEHANDLUNG 68

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen	68
Glühverfahren der Eisenwerkstoffe	69
Härteverfahren der Stahlwerkstoffe	70
Wärmebehandlung von Schneidwerkzeugen	71
Wärmebehandlung von Nicht-Eisenwerkstoffen	72

W4 HALBZEUGE 73

Ausgewählte Stahlsorten für Halbzeuge	73
Herstellung von Halbzeugen	74
Stahlerschmelzung	74
Strangguss	74
Warmwalzen	74
Kaltwalzen	74
Kaltziehen	74
Strangpressen	75
Stahlprofile (Auswahl)	75
Aluminiumprofile (Auswahl)	75

W5 ZERSPANBARKEIT 76

Zerspanungshauptgruppen (Werkstoffeinfluss)	76
Zerspankraft F	78
Spanform	78
Spandickenstauchung	78
Werkzeugverschleiß und Standzeit	79
Standzeit T	79
Zerspanungskenngröße Oberflächengüte	80

W6 STAHLWERKSTOFFE 81

Stähle für den Stahlbau	81
Stähle für den Maschinenbau	82
Stähle für den Druckbehälterbau	82
Einsatzstähle	83
Vergütungsstähle	83
Nitrierstähle	84
Automatenstähle	84
Hochlegierte korrosionsbeständige Stähle	85
Warmfeste Stähle	85
Warm- und Kaltarbeitsstähle	86
Federstähle und AFP-Stähle	86

W7 GUSSEISENWERKSTOFFE 87

Gusseisen mit Lamellengraphit (EN-GJL)	88
Gusseisen mit Kugelgraphit (EN-GJS)	88
Temperguss (EN-GJMW und EN-GJMB)	89
Gusseisen mit Vermiculargraphit (EN-GJV)	89
Austenitisches Gusseisen (EN-GJLA)	90
Stahlguss (G)	90

W8 NICHEISENMETALLE 91

Einteilung der NE-Metalle	91
Norm-Bezeichnungen von NE-Metallen	91
Aluminiumlegierungen	92
Kupferlegierungen	93
Magnesiumlegierungen	94
Nickelbasislegierungen	94
Titanlegierungen	94

W9 SINTERMETALLE 95

Normung der Sinterwerkstoffe	95
Mechanische Eigenschaften von Sintermetallen nach DIN EN 30910-1	96
Gesinterte Werkstücke (Bezeichnungsbeispiele)	96

W10 KUNSTSTOFFE 97

Einteilung der Kunststoffe	97
Eigenschaften und Verwendung	98
Thermisches Wärmeverhalten der Kunststoffe – Allgemeine Zerspanungshinweise	99
Duroplaste und Schichtverbunde	100
CFK-Metall-Schichtverbunde (Stacks)	100
Zerteilen und Sonderverfahren	101

F FERTIGUNGSTECHNIK

F1 GRUNDLAGEN 102

Historischer Rückblick	102
Zerspanverfahren	104
Zerspanungsprinzip	106
Spanungsbewegungen	106
Spanungsgeschwindigkeit	107
Schnitt- und Spanungsgrößen	110
Spanbildung	113
Spandickenstauchung λ_h	113
Spangeschwindigkeit v_{sp}	114
Scherwinkel Φ	114
Spanflächenreibungswert μ_{sp}	114
Einfluss der Reibung auf die Spanbildung	115

Spanformen	116
Spanformdiagramm	116
Einflüsse auf die Spanformung	117
Zerspankräfte	118
Zerspankraftkomponenten	118
Spezifische Schnittkraft k_c	119
Schnittkraftberechnung	120
Einflussgrößen auf die Zerspankraft	121
Spanungsarbeit	122
Zerspanungsleistung	122
Schnittleistung	122
Maschinenleistung	123
Schnittmoment	123
Standkriterien des Werkzeugs	124
Standzeit	124
Standweg L_f	124
Standmenge	125
Ermittlung der Standzeit	125
Standzeitgerade	125
Einflüsse auf die Standzeit	126
Energiebilanz	126
Werkzeugverschleiß	127
Verschleißursachen	128
Verschleißformen	129
Schneidengeometrie	130
Fundamentals of metal cutting	132
F2 SCHNEIDSTOFFE UND BESCHICHTUNGEN	134
Schneidstoffe	135
Hartmetalle	137
Cermets	138
Kubisches Bornitrid, BN (CBN)	140
Diamant	141
F3 BOHRVERFAHREN	142
Bohren und Senken	142
Bohren ins Volle	143
Profilbohren	150
Senken	152
Plansenken	154
F4 REIBEN	155
Rundreiben	155
Profilreiben	158
F5 SÄGEN	159
Sägeverfahren	159
Sägeblätter	159
Automatische Bandsäge	160

F6 FRÄSTECHNIK	161
Einteilung der Fräsverfahren	161
Schnittgrößen beim Fräsen	163
Vermeidung von Problemen beim Fräsen	170
Teilung am Fräswerkzeug	170
Fräswerkzeuge	171
Besondere Fräsverfahren	172
Aktuelle Technologien	177
Bauformen von Fräsmaschinen	178
Fräsmaschinen mit horizontaler Bearbeitungsachse	178
Fräsmaschinen mit vertikaler Bearbeitungsachse	179
Berechnungen der Hauptnutzungszeit	185
Herstellung eines Komplettbearbeitungswerkzeugs	190
Kundenauftrag	190
Projektierung	190
Betriebliche Leistungsprozesse	191
F7 DREHTECHNIK	196
Allgemeines	196
Schnittgrößen beim Drehen	197
Innenausdrehen	203
Abstech- und Einstechdrehen	205
Besondere Drehverfahren	207
Arbeitsplanung beim Drehen	208
Berechnungen und Beispiele zur Arbeitsplanung	209
Rauheitsberechnung	210
Berechnungen der Hauptnutzungszeit	215
Beispiel zur Arbeitsplanung beim Drehen	216
F8 AUTOMATENDREHTECHNIK	232
Fertigungskriterien	232
Drehautomaten	232
F9 GEWINDEHERSTELLUNG	235
Allgemeines	235
Innengewindefräsen	236
Gewindedrehfräsen	238
Gewindewirbeln	239
Gewindedrehen	239
F10 RÄUMEN, HOBELN UND STOSSEN	243
Räumen	243
Hobeln und Stoßen	245
F11 SCHLEIFTECHNIK	246
Systematik der Schleifverfahren	247
Schleifprozess	248
Zerspanungsvorgang und Zerspanungsgrößen	250
Härte und Gefüge	256

Schleiftechnisches Grundprinzip	257
Schnittwerte beim Schleifen	260
Werkzeugverschleiß beim Schleifen	262
Betriebssicherheit beim Schleifen	267
Rundschleifverfahren	268
Arbeitsplanung beim Schleifen	274
Grinding	282

F12 FEINBEARBEITUNGSVERFAHREN 284

Umformende Feinbearbeitungsverfahren	284
Elektrochemisches Abtragen	286
Honen	287
Läppen	289
Ultraschallschwingläppen	290
Funkenerosives Abtragen	291
Strukturgebende Verfahren	292
Laserhonen	292
Laserstrukturieren	293
Beschichten und Honen	294

F13 FÜGEVERFAHREN 295

Press- und Schnappverbindungen	298
Pressverbindungen	298
Schnappverbindungen	299
Kleben	300
Löten	302
Grundlagen des Lötens	302
Lötverfahren	304
Lote	305
Flussmittel	306
Beispiel einer Lötarbeit	307
Schweißen	308
Einteilung der Schweißverfahren	308
Gestaltung der Schweißstelle	309
Lichtbogenschweißen	310
Schutzgasschweißen	313
Gasschmelzschweißen	316
Strahlschweißen	318
Pressschweißen	319
Einsatz der Schweißverfahren	320
Prüfen von Schweißverbindungen	320

F14 UMFORMEN 321

Verhalten der Werkstoffe beim Umformen	321
Umformverfahren	321
Biegeumformen	322
Festlegung der gestreckten Länge	322
Biegeradius	323

F15 ZERSpanungstechnologie 324

Fertigungstechnische Entwicklungstrends	324
Hochgeschwindigkeitsbearbeitung – HSC	325
Merkmale der HSC-Technologie	325
Technologischer Hintergrund	326
Bearbeitungsstrategien	327
Maschinentechnologie	329
Antriebskonzepte	330
HSC-Werkzeuge	331
Werkzeugaufnahme	332
Unwucht rotierender Systeme	333
Bearbeitung harter Werkstoffe	335
Minimalmengenschmierung	337
Trockenbearbeitung	339

F16 FERTIGUNGSVERFAHREN 341

Die Optimierung von Fertigungsabläufen	343
Urformen	345
Urformen mit formgebendem Werkzeug aus dem flüssigen Zustand, Gießen	345
Der prinzipielle Verfahrensablauf beim Gießen	346
Erstarrungsvorgänge	346
Gießverfahren	347
Urformen mit formgebendem Werkzeug aus dem breiigen Zustand	352
Urformen mit formgebendem Werkzeug aus dem pulverförmigen Zustand	353
Additive Fertigungsverfahren	355
Stereolithographie (SL)	356
Solid Ground Curing (SGC)	356
Selective Laser Sintering (SLS)	357
3D-Printing (3DP)	357
Fused Deposition Modelling (FDM)	358
Layer Objekt Manufacturing (LOM)	358
Abformverfahren und Folgeprozesse	358
Umformtechnik	359
Druckumformen	360

B BETRIEBSTECHNIK

B1 WARTUNG UND INSTANDHALTUNG 362

Wartung	362
Inspektion	364
Instandsetzung	365
Verbesserung	366
Steigerung der Qualitätsfähigkeit	367

B2 BETRIEBSSTOFFE	369	Qualitätskreis	428
Schmierstoffe	369	Qualitätsmanagementsysteme	429
Schmierstoffarten	370	Prozessorientierung	429
Festschmierstoffe	372	Komponenten des Qualitätsmanagements	430
Kühlschmierstoffe KSS	372	Qualitätssicherung (Qualitätsprüfung)	431
		Prüfmittelüberwachung	432
		Prüfdokumentation und Datensicherung	436
		Kundenorientierung	437
B3 WERKZEUGMASCHINEN	376	Qualitätssicherung in der Fertigung	438
Die Werkzeugmaschine als technisches System und Produktionsfaktor	376	Untersuchung der Maschinenfähigkeit	438
Einteilung der Werkzeugmaschinen nach den Fertigungsverfahren	377	Ermittlung der Maschinenfähigkeit	440
Bohrmaschinen	378	Untersuchung der Prozessfähigkeit	442
Drehmaschinen	379	Statistisches Qualitätsmanagement	443
Fräsmaschinen	383	Grundlagen des statistischen Qualitätsmanagements	443
Schleifmaschinen	386	Qualitätsregelkarten als Instrumente der Fertigungsüberwachung	444
Sondermaschinen	388	Stärkung des Unternehmens durch Qualitätsmanagement	447
Abtragende Maschinen	388	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	447
Antriebseinheiten einer Werkzeugmaschine	389	Zertifizierung als ein Ziel des Qualitätsmanagements	448
Energieübertragungseinheit des Hauptantriebs	393	Umweltmanagement	449
Energieübertragungseinheit des Vorschubantriebs	395		
Stütz- und Trageeinheit	398	03 PRÜFTECHNIK	450
Sicherheitseinrichtungen an einer Werkzeugmaschine	399	Die Entwicklung der Prüftechnik	450
Betriebssicherheit von Werkzeugmaschinen	399	Aufbau der Messanordnung	452
Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen	400	Begriffe der Messtechnik	453
Machine tools	401	Messanordnungen	455
		Messabweichungen	457
B4 SPANNTÉCHNIK	403	Prüfen von Maßen, Formen und Lagen	458
Werkzeugspanntechnik	403	Prüfen von Maßen und Maßtoleranzen	458
		Prüfen von Formen und Lagen	461
B5 ANSCHLAGMITTEL	413	Prüfen von Oberflächen	467
Anschlagketten	413	Grundbegriffe	467
Anschlagseile	416	Gestaltabweichungen	467
Hebebänder und Rundsclingen	418	Rauheitsmessgrößen	468
		Oberflächenprüfverfahren	468
0 PRODUKTIONSPLANUNG UND QUALITÄTSMANAGEMENT		Bewertung der Oberflächengüte	470
		Oberflächenangaben in Zeichnungen	470
01 PRODUKTIONSPLANUNG UND PRODUKTIONSSTEUERUNG	419	Toleranzen und Passungen	471
Planung des Produktionsprozesses	419	Grundbegriffe	471
Fertigungssteuerung	422	Allgemeintoleranzen	473
Ermittlung der Auftragszeit	423	Maßtoleranzen	473
Kostenrechnung	424	ISO-Toleranzen	474
Kostenstellenrechnung	424	Geometrische Produktspezifikation ISO-GPS	476
Kostenträgerrechnung	426	Passungsarten	477
		Passungssysteme	479
02 QUALITÄTSMANAGEMENT	427	Auswahl und Auswertung von Passtoleranzintervallen	481
Zielsetzung	427		
Qualität	427		

**UNTERWEISUNGSBLATT
FÜR ARBEITSSCHUTZ**
**Erste Hilfe im Betrieb – Prävention und Notfallmaßnahmen
Sicherheitshinweise zur Ersten Hilfe**

Prävention

Lassen Sie sich zum betrieblichen Ersthelfer ausbilden.

Informieren Sie sich am Arbeitsplatz über den Standort von Sanitätsraum, Verbandskasten, Liege, Notfall- und Augenduschen, über die Erreichbarkeit der Ersthelfer und über die Notfallpläne.

Kenntnisse Sie die Notrufnummern am Telefon. **Rettensdienst: 19222**

Nehmen Sie regelmäßig an Unterweisungen und Erste-Hilfe-Übungen teil.

Halten Sie ausreichend Verbandsmaterialien bereit und überprüfen Sie regelmäßig die Vollständigkeit der Verbandskästen. Achten Sie darauf, dass die Standorte für Erste-Hilfe-Materialien schnell erreichbar und gut sichtbar gekennzeichnet sind.


Notfall

Behalten Sie die Ruhe und verschaffen Sie sich einen Überblick über die Gefahrensituation.

Sichern Sie die Gefahrenstelle bzw. Unfallstelle ab.

Schalten Sie bei **Stromunfällen** erst den Bereich frei, bevor Sie den Verletzten berühren.

Achten Sie bei der Bergung und der Versorgung Verletzter auch auf Ihre eigene Sicherheit.

Prüfen Sie Allgemeinzustand, Bewusstsein und Atmung des Verletzten und überwachen Sie diese laufend.

Setzen Sie einen Notruf mit folgenden Angaben ab:

- **Wo** ist der Unfall geschehen?
- **Was** ist geschehen?
- **Wie** viele Personen sind verletzt?
- **Welche Art** der Verletzungen liegen vor?
- **Warten** Sie Rückfragen der Rettungsleitstelle ab.

Bewahren Sie abgetrennte Gliedmaßen möglichst gekühlt auf. Geben Sie diese den Rettungskräften mit.

Halten Sie sich als Ansprechpartner für die Rettungsleitstelle und den Notarzt zur Verfügung.

Vermeiden Sie ungeschützten Kontakt mit Körperflüssigkeiten, z. B. Blut oder Sekrete.



Erste Hilfe

Auffinden einer Person

Grundsätze

Ruhe bewahren
Unfallstelle sichern
Eigene Sicherheit beachten

Notruf

Wo ist der Notfall?
Warten auf Fragen, zum Beispiel:
Was ist geschehen?
Wie viele Verletzte/Erkrankte?
Welche Verletzungen/Erkrankungen?

Person ggf. aus dem Gefahrenbereich retten

Bewusstsein prüfen
laut ansprechen, anfasseln, rütteln

um Hilfe rufen

Atmung prüfen
Atemwege freimachen, Kopf nach vorne neigen, Gimm anheben, sehen/hören/fühlen

keine normale Atmung

Notruf

30 x Herzdruckmassage
Hände in Brustmitte, Drucktiefe 5 – 6 cm, Arbeitstempo 100 – 120/min

2 x Beatmung
Is lang Luft in Mund oder in Nase einblasen

AED* holen lassen

vorhanden

Situationsgerecht helfen
z.B. Wunde versorgen

normale Atmung

Seltenlage

Bewusstsein und Atmung überwachen

Notruf

Lerne helfen – werde Ersthelfer/Ersthelferin

* Sofern verfügbar – das Anzeigenschild des „Automatisierten Externen Defibrillators“ (AED) folgen.

© DGUV Informations 294-001 „Erste Hilfe“, Ausgabe August 2017 • Herausgeber: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung i.V. DGUV, Glöckstraße 40, 10117 Berlin, www.dguv.de

DIN 13169 • Großer Betriebs-Verbandskasten

Anz.	Bezeichnung
2	Heftpflaster 500 cm x 2,5 cm, Spule mit Außenschutz
	<i>Fertigpflaster set – bestehend aus:</i>
16	• Wundschnellverband 10 cm x 6 cm
8	• Fingerkuppenverbände
8	• Fingerverbände 12 cm x 2 cm
8	• Pflasterstrips 1,9 cm x 7,2 cm
16	• Pflasterstrips 2,5 cm x 7,2 cm
2	Verbandpäckchen DIN 13151 - K, 300 cm x 6 cm mit Kompresse 6 cm x 8 cm
6	Verbandpäckchen DIN 13151 - M
2	Verbandpäckchen DIN 13151 - G, 400 cm x 10 cm mit Kompresse 10 cm x 8 cm
-	Verbandtuch DIN 13152 - BR, 40 cm x 60 cm
2	Verbandtuch DIN 13152 - A, 60 cm x 80 cm
4	Fixierbinde DIN 61634 - FB 6, 400 cm x 6 cm
4	Fixierbinde DIN 61634 - FB 8, 400 cm x 8 cm
2	Rettungsdecke mind. 210 cm x 160 cm
12	Kompresse 10 cm x 10 cm
4	Augenkompressen 5 cm x 7 cm
2	Kälte-Sofortkompressen mindestens 200 cm ²
4	Dreiecktuch DIN 13168 - D
-	Verbandkastenschere DIN 58279 - A 145
1	Verbandkastenschere DIN 58279 - B 190
8	Medizinische Einmal-Handschuhe
4	Folienbeutel
10	Vliesstofftuch
-	Feuchttuch zur Reinigung unverletzter Haut
1	Erste-Hilfe-Broschüre/Anleitung zur Ersten Hilfe
1	Inhaltsverzeichnis

G1 MECHANIK

Die Mechanik ist das älteste Teilgebiet der Physik. Sie beschreibt die Grundeigenschaften von Körpern und Stoffen (Volumen, Masse, Dichte), den inneren Aufbau von Stoffen, die Bewegung von Körpern und die Wirkungen von Kräften auf Körper.

Die Mechanik wird unterteilt in **(Bild 1)**:

Kinematik: Bewegungen von Körpern ohne Berücksichtigung der einwirkenden Kräfte.

Dynamik: Bewegungen von Körpern mit Berücksichtigung der einwirkenden Kräfte. Die Dynamik wird weiter unterteilt in die **Statik** (unbewegte Körper durch Kräftegleichgewicht) und die **Kinetik** (Bewegungen durch Kräfteeinwirkung).

Die Mechanik lässt sich auch nach dem jeweiligen **Aggregatzustand** (fest, flüssig oder gasförmig) eines betrachteten Körpers unterteilen.

Mechanik fester Körper (Festkörpermechanik):

- Mechanik starrer Körper (Massepunkte und unverformbare Körper) **(Bild 2)**.

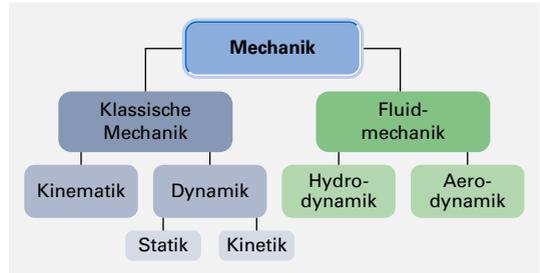
Festigkeitslehre:

- Mechanik elastischer Körper. Die Elastizitätstheorie beschreibt elastische Verformungen. Das sind Verformungen, die sich nach Aufheben der verursachenden Kräfte wieder ohne bleibende Verformung zurückbilden (z. B. Feder) **(Bild 3)**.
- Mechanik plastischer Körper. Die Plastizitätstheorie beschreibt plastische Verformungen, also bleibende Verformungen, die sich nach Aufheben der verursachenden Kräfte nicht wieder zurückbilden **(Bild 4)**.

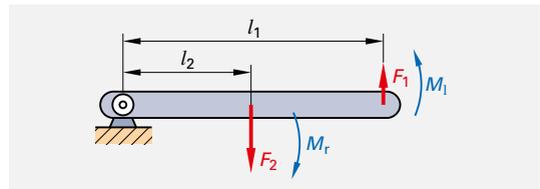
Mechanik flüssiger oder gasförmiger Stoffe

(Fluid- und Aeromechanik):

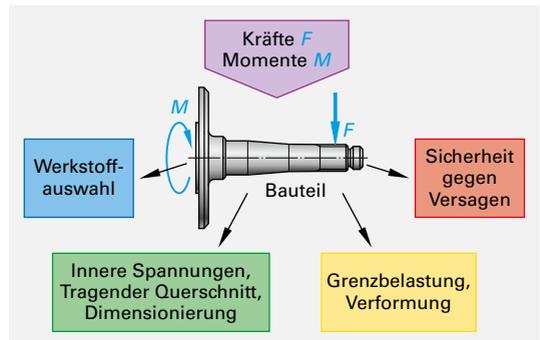
- Mechanik idealisierter, reibungsfreier Flüssigkeiten.
- Mechanik ruhender (statisch) Flüssigkeiten und Gase, Hydrostatik für Flüssigkeiten und Aerostatik für Gase.
- Mechanik bewegter (dynamisch) Flüssigkeiten und Gase, Hydrodynamik von Flüssigkeiten und Aerodynamik für Gase.
- Mechanik bewegter, realer Flüssigkeiten und Gase unter Berücksichtigung der Reibungsvorgänge, Temperaturen und Drücke (Strömungsmechanik, Thermodynamik **(Bild 5)**).



1 Teilgebiete der Mechanik



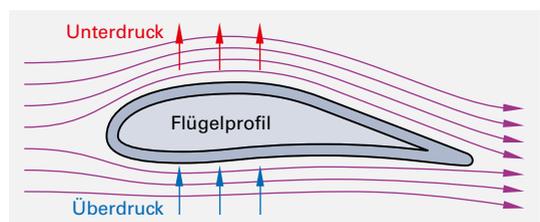
2 Mechanik starrer Körper, Statik



3 Kernaufgaben der Festigkeitslehre



4 Zugversuch, Zugproben



5 Strömungsmechanik

Elektrische Leistung und elektrische Arbeit

Die Energie-Versorgungs-Unternehmen (EVU) stellen allen Nutzern elektrischer Maschinen und Geräte elektrische Energie zur Verfügung.

Die dem elektrischen Netz pro Zeiteinheit entnommene Energie nennt man elektrische Leistung. Sie wird in Watt (W), Kilowatt (kW) oder Megawatt (MW) gemessen.

Bei elektrischen Betriebsmitteln wird auf dem Leistungsschild die dem Netz entnommene Leistung, bei Elektromotoren hingegen die abgegebene Leistung angegeben (**Bild 1**).

Elektrische Leistung bei Gleichstrom und induktionsfreiem Wechselstrom oder Drehstrom

Bei einem an Gleichspannung betriebenen Verbraucher ist die Leistung P umso größer, je größer die angelegte Spannung U und der Strom I sind. Gleiches gilt für Verbraucher an Wechselspannung, wenn sie neben dem ohmschen Widerstand keine induktiven Teile (Spulen) oder kapazitive Teile (Kondensatoren) enthalten (**Bild 2**).

Elektrische Leistung bei Verbraucher mit ohmschem Widerstand an Gleichstrom und induktionsfreiem Wechselstrom

$$P = U \cdot I$$

Beim Drehstrom ist der Stromverlauf in den drei Leitern zeitlich gegeneinander verschoben. Die Leistung berechnet man mit dem Verketzungsfaktor $\sqrt{3}$ (**Bild 3**).

Elektrische Leistung bei Verbraucher mit ohmschem Widerstand an Drehstrom

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Elektrische Leistung von Verbrauchern mit induktiven und kapazitiven Anteilen bei Wechselstrom und Drehstrom

Bei Verbrauchern, die neben dem ohmschen Widerstand auch Spulen und Kondensatoren enthalten, kommt es zu einer zeitlichen Verschiebung (Phasenverschiebung) zwischen Strom und Spannung. Diese Verschiebung mindert die tatsächlich am Verbraucher umgesetzte Leistung, Wirkleistung genannt, um den Leistungsfaktor $\cos \varphi$ (**Bild 4** und **Bild 5**).

Wirkleistung bei Wechselstrom

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Wirkleistung bei Drehstrom

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Beispiel: Für einen Dreiphasen-Drehstrommotor gibt der Hersteller folgende Daten an: $U = 400 \text{ V}$, $I = 26,6 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0,87$, $\eta = 93,5 \%$

Wie groß sind a) aufgenommene und b) abgegebene Leistung?

Lösung: a) $P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 26,6 \text{ A} \cdot 0,87 = 16033 \text{ W}$

b) $P_2 = P_1 \cdot \eta = 16033 \text{ W} \cdot 0,935 = 14990 \text{ W}$

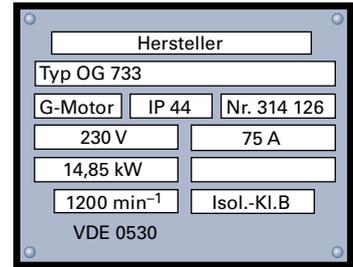
Elektrische Arbeit

Je größer die Leistung P und die Betriebsdauer t eines Verbrauchers ist, desto größer ist die elektrische Arbeit.

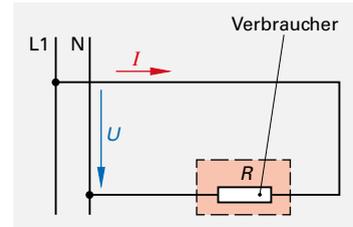
Elektrische Arbeit

$$W = P \cdot t$$

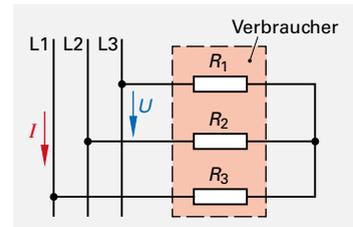
Einheiten der Arbeit sind: Wattsekunde (Ws) und Kilowattstunde (kWh). Die elektrische Arbeit wird von Stromzählern in kWh gemessen.



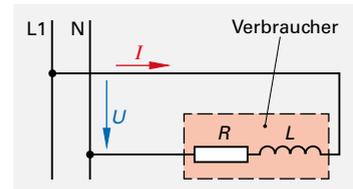
1 Leistungsschild eines Gleichstrommotors



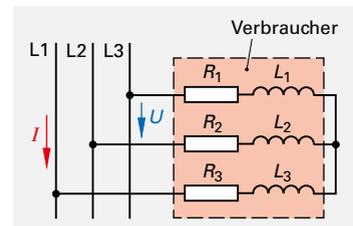
2 Leistung bei Gleichstrom im Stromkreis mit ohmschem Verbraucher



3 Leistung bei Drehstrom im Stromkreis mit drei ohmschen Verbrauchern



4 Leistung bei Wechselstrom mit ohmschem und induktivem Verbraucher



5 Leistung bei Drehstrom mit ohmschem und induktivem Verbraucher

W2 WERKSTOFFPRÜFTECHNIK

Das Aufgabengebiet der Werkstoffprüftechnik umfasst drei Bereiche, die durch spezifische Aufgaben voneinander unabhängig unterschiedliche Prüfaufgaben und Bewertungen realisieren:

- **Bestimmung technologischer Eigenschaften** z. B. der Zugfestigkeit R_m , die als wesentliches Kriterium für die Werkstoffauswahl von Bedeutung ist.
- **Prüfung fertiger Werkstücke** auf festgelegte Werkstoffparameter zur Vermeidung von Schadensfällen.
- **Ermittlung von Schadensursachen** und somit Vermeidung ähnlicher zukünftiger Schadensfälle.

Eine Unterteilung der Prüfung von mechanischen Werkstoffeigenschaften erfolgt nach der Geschwindigkeit, wie die jeweilige Prüfkraft einwirkt. Bei **statischen Prüfverfahren**, dazu gehören der Zug-, Druck- und Scherversuch sowie die Härteprüfung, wird die Belastung langsam aufgebracht. Bei **dynamischen Prüfverfahren**, z. B. beim Kerbschlagbiegeversuch oder bei der Dauerfestigkeitsprüfung, wird die Belastung schlagartig, schnell bzw. wechselnd aufgebracht.

Werkstoffprüfung metallischer Werkstoff durch zerstörende Prüfverfahren

Zugversuch

Mithilfe des Zugversuchs werden mechanische Kennwerte eines Werkstoffes ermittelt. Die Versuchsvorbereitung, Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung ist durch Normvorschriften festgelegt.

Versuchsdurchführung

Die **genormte Zugprobe** wird axial in die Spannköpfe einer **Universalprüfmaschine (Bild 1)** eingespannt. Infolge des kontinuierlich langsam nach oben sich bewegenden Jochs wird die Zugprobe durch eine stetig anwachsende Zugkraft belastet. Unter der Einwirkung der Zugkraft verlängert sich die Zugprobe bis zum Bruch.

An der Zugprobe wird unter dem Einfluss der Zugkraft eine sichtbare Querschnittsveränderung messbar. Das Maximum ist aus der Kurve des Spannungs-Dehnungs-Diagramms ersichtlich.

Nach dem Erreichen der Kraft F_m (Kurvenmaximum) schnürt sich der Zugstab sichtlich ein, wird deutlich länger und zerreißt. Die erforderliche Zugkraft nimmt während des Einschnürens immer mehr ab und beträgt beim Bruch der Zugprobe Null.

Versuchsauswertung

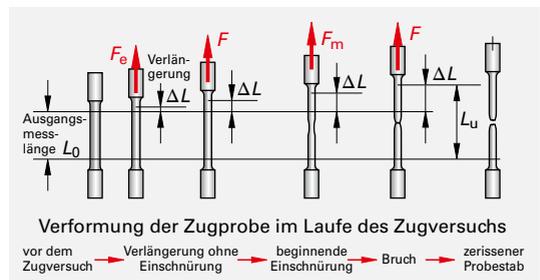
Während des Zugversuches wird kontinuierlich die **Zugkraft F** und die **Verlängerung Δl** mithilfe einer Messeinrichtung erfasst.

Aus der Zugkraft und dem Ausgangsquerschnitt ergibt sich die **Zugspannung δ_z** in N/mm^2 .

Aus der Verlängerung der Zugprobe $\Delta l = L - L_0$ errechnet sich die **Dehnung ϵ** in % (Bild 2).



1 Universalprüfmaschine



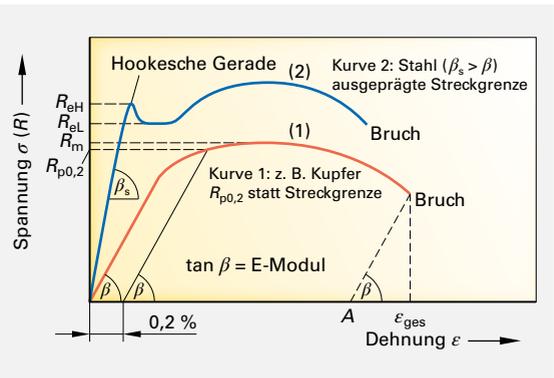
2 Zugstabverformung beim Zugversuch

Spannungs-Dehnungs-Schaubild

Ein **Spannungs-Dehnungs-Diagramm** als grafische Darstellung und Auswertung von Zugversuchen dient der Bestimmung von Werkstoffkenngrößen.

Werkstoffe ohne und mit einer ausgeprägten Streckgrenze:

- Die Dehngrenze $R_{p0,2}$ definiert eine plastische Dehnung von 0,2 %: Kurve 1.
- Die Streckgrenze wird durch die Kenngrößen R_{eH} und R_{eL} exakt definiert, z.B. für S235JR: Kurve 2.
- Die Steigungswinkel β_s und β der Werkstoffgruppen sind ungleich.



Festigkeitskennwerte

Festigkeitskennwerte	Beschreibung	Bestimmung
Streckgrenze R_e N/mm^2	Die Streckgrenze R_e ist die Spannung, bis zu der ein Werkstoff bei einachsiger und momentfreier Zugbeanspruchung eine elastische und keine plastische Verformung zeigt.	$R_e = \frac{F_s}{S_0}$ F_s Zugkraft in N S_0 Probenquerschnitt in mm^2
obere Streckgrenze R_{eH}	Die obere Streckgrenze R_{eH} ist durch den ersten deutlichen Spannungsabfall im Spannungs-Dehnungs-Schaubild gekennzeichnet.	$R_{eH} = \frac{F_{sH}}{S_0}$
untere Streckgrenze R_{eL} N/mm^2	Die untere Streckgrenze R_{eL} ist die kleinste Spannung im Fließbereich (Spannungsschwankungen werden nicht berücksichtigt).	$R_{eL} = \frac{F_{sL}}{S_0}$ F_{sH} Zugkraft obere Streckgrenze F_{sL} Zugkraft untere Streckgrenze
Dehngrenze R_p N/mm^2	Die Dehngrenze R_p ist die Spannung, die zu einer bestimmten bleibenden Dehnung führt.	
0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ N/mm^2	Die 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ ist die Spannung, bei der die plastische Dehnung 0,2 % beträgt. In der Praxis legt dieser Wert häufig die absolute Obergrenze der zulässigen Belastung eines Bauteils fest. Der Wert von $R_{p0,2}$ wird durch einen Schnitt der Kurve mit einer Parallelen zur Hookeschen Geraden bei der Dehnung $\epsilon = 0,002$ (0,2 %) ermittelt. Eine weitere Annäherung an den Übergangswert R_e ermöglichen die Kennwerte $R_{p0,1}$ bzw. $R_{p0,01}$.	$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$ $R_{p0,2}$ Dehngrenze (Ersatzstreckgrenze) in N/mm^2 $F_{p0,2}$ Zugkraft an der Dehngrenze in N
Zugfestigkeit R_m N/mm^2	Die Zugfestigkeit R_m ist die maximale ertragene, technische Spannung. Nach dem Überschreiten der Streckgrenze R_e verfestigt sich der Werkstoff und die Spannung steigt bis zu einem Spannungsmaximum weiter an. Bei der höchsten Zugkraft wird die Zugfestigkeit R_m erreicht. Wird ein Bauteil höher belastet, erfolgen Einschnürung und Bruch.	$R_m = \frac{F_m}{S_0}$ R_m Zugfestigkeit in N/mm^2 F_m Maximale Zugkraft in N
E-Modul E N/mm^2	Der E-Modul E entspricht der Steigung der Geraden im elastischen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms und ist ein Maß für die Steifigkeit des Werkstoffs und damit ein Maß für den Widerstand gegen elastische Verformung.	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_{el}}$ σ Spannung in N/mm^2 ϵ_{el} Dehnung in %

Kupferlegierungen

Eigenschaften und Anwendung

Kupfer wird aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften (**Tabelle 1**) sowohl als **reines Metall** als auch mit seinen Hauptlegierungselementen **Zn, Sb, Al** und **Pb** in der Technik für ein breites Anwendungsspektrum verwendet.

Messing

Besteht **unter 38 % Zinkanteil** aus **kubisch-flächenzentrierten Mischkristallen (Bild 1)**. Die vorhandenen Gleitebenen im Gefüge gewährleisten die gute Umformbarkeit. Geringe Zusätze von **Fe, Sb, Mn** und **Si** verbessern zusätzlich die Zug- und Verschleißfestigkeit sowie die Korrosionsbeständigkeit. Als **Knetlegierungen** werden sie verwendet bei:

- **CuZn15** (CW502L) für Druckdosen,
- **CuZn31Si1** (CW708R) für Buchsen,
- **CuAl8Fe3** (CW708G) für Ventilsitze.

Über 38 % Zinkanteil bildet sich ein **Kristallgemenge (Bild 1)** aus, das sich gut gießen und zerspanen lässt. Durch Zulegieren bis 3,5 % wird die Spanbarkeit positiv beeinflusst.

Gusslegierungen finden vor allem bei den sogenannten **Automatenlegierungen** Verwendung, z. B. für Drehteile CuZn39Pb3.

Zinnbronze

Die Zinnbronzen sind im Vergleich zu Messing korrosionsbeständiger sowie zug- und verschleißfester (R_m bis 690 N/mm², HB bis 210). Zinn wird im Bereich zwischen 2 ... 15 % zulegiert, werkstoff- und bearbeitungsentscheidend ist die **9 % Zinn-Grenze**.

Knetlegierungen mit Sn bis 9 % lassen sich aufgrund des Kristallaufbaus gut umformen. Werkstücke aus **Gusslegierungen** sind härter und das Hauptbetätigungsfeld für die Zerspanung.

Zinnbronzen mit 9 % ... 15 % Sb-Anteil, die ein Kristallgemenge ausbilden, lassen sich gut spanend bearbeiten (**Bild 2**).

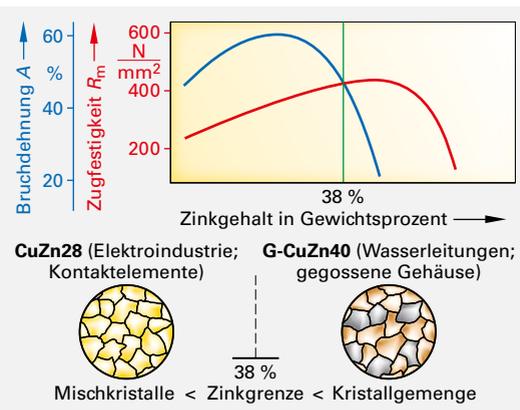
Rotguss

Die Zinn- und Zinkanteile sowie weitere Beimengungen bilden beim Erstarren ein Kristallgemenge mit guter Zerspanbarkeit aus.

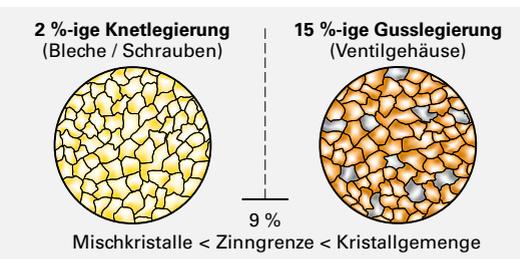
Rotguss ist sehr korrosionsbeständig und eignet sich zum Vergießen und Bearbeiten dünnwandiger Werkstücke (**Bild 3**).

Tabelle 1: Eigenschaften von Kupfer und -legierungen

Eigenschaften	Anwendung
sehr gute elektr. Leitfähigkeit	Elektrotechnik
sehr gute Wärmeleitfähigkeit	Wärmetauscher
gute Umformbarkeit (Kfz-Gitter)	Halbzeuge bis 0,01 mm Dicke (Folien, Drähte)
legierungsabhängige Zerspanbarkeit (von sehr gut bis problemhaft)	Bearbeitung von Guss- und Knetlegierungen



1 38 %-Grenze von Messing



2 Zinnbronzegefüge (schematisch)



3 Bearbeitung von Rotgusswerkstücken

Magnesiumlegierungen

Magnesiumlegierungen, z. B. MgAl 7 ZnF 32, werden vorwiegend als **Gusswerkstoffe**, für das Druckgussverfahren, verwendet. Die eingebrachten Legierungselemente Zn, Al, Mn, Si und Zr beeinflussen die **Dehngrenze $R_{p0,2}$** , **Zugfestigkeit R_m** , **Bruchdehnung A** und **Härte HBW** (s. Tabellenbuch Zerspantechnik). Die geringe Dichte $\rho = 1,74 \text{ kg/dm}^3$ ist für die zahlreichen Anwendungen interessant.

Eine sehr gute Oberflächenqualität bei der spanenden Bearbeitung wird durch hohe Einstellwerte und den Einsatz geeigneter KSS erzielt. Dies gilt für Verfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden, z. B. Drehen und Fräsen, als auch für Verfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden, z. B. Schleifen. Werkzeuge mit positiver Schneidengeometrie sind bevorzugt zu verwenden (**Bild 1**). Die geringen Schnittkräfte und der Werkzeugverschleiß ergeben große Standzeiten der Werkzeuge. Vorsicht beim Umgang mit wassermischbaren KSS, es kann brennbarer Wasserstoff freigesetzt werden. Die Kaltumformbarkeit ist eingeschränkt.



1 Gussteil aus Magnesiumlegierung

Nickelbasislegierungen

Nickel besitzt als Basismetall hohe Dehnungs- und Festigkeitswerte. Durch das Legieren mit den Hauptbestandteilen Cr, Co, Mo, Ti, W entstehen hochfeste und korrosionsbeständige Werkstoffe. Die Schmierneigung und die hohen Zerspannungstemperaturen erfordern scharfe Schneidwerkzeuge mit Spanwinkeln $\chi = 5^\circ \dots 15^\circ$ und Freiwinkeln $\alpha = 6^\circ \dots 10^\circ$, die nur mit geringen Schnittwerten gefahren werden können. Der Spanungsquerschnitt sollte bei der Bearbeitung von Nickellegierungen im Verhältnis zu Stahl größer gewählt werden.

Nickelbasislegierungen oder **Superlegierungen**, z. B. NiCr19Co11Mo (2.4973), werden zusätzlich mit weiteren Legierungselementen (Fe, C, W) für die speziellen Anwendungsbereiche in Chemieanlagen-, Kraftwerks- und Turbinenbau hergestellt. Die Zuführung von KSS unter Hochdruck verhindert bei der spanenden Bearbeitung der Superlegierungen ungewollte Gefügeveränderungen.



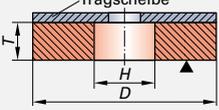
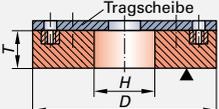
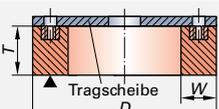
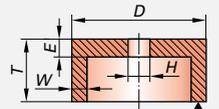
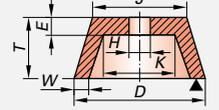
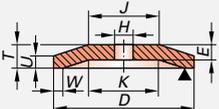
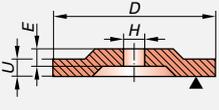
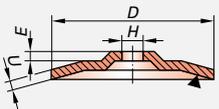
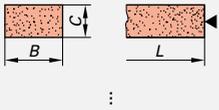
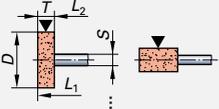
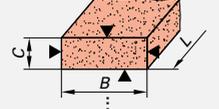
2 Bauteil aus Inconel 600 (Nickelbasislegierung NiCr15Fe)

Titanlegierungen

Titanlegierungen, z. B. TiAl4Mo4Sn2 (3.7185), sind die prädestinierten Werkstoffe für die Medizintechnik und die Luft- bzw. Raumfahrttechnik. Die hohen Festigkeits- und Zähigkeitswerte bei einer geringen Dichte sind dafür entscheidend. Spezielle Anforderungen werden durch die Anwendung weiterer Legierungselemente erfüllt. Titanlegierungen sind schwer spanbar aufgrund der hohen Zähigkeit und der schlechten Wärmeleitfähigkeit (**Bild 3**). Die zähen Späne neigen zum „Festkleben“ auf der Freifläche. Ausbröckelungen an der Schneidkante und Freiflächenverschleiß sind typisch. Hochwarmfeste beschichtete Hartmetalle der Sorte K und Cermets garantieren wirtschaftliche Schnittgeschwindigkeitswerte v_c , die bei 40m/min ... 60 m/min liegen. Ein wirksamer KSS unter Hochdruck ist für die Abfuhr der Zerspanungswärme unumgänglich. Zerspannungstemperaturen über 400 °C sind zu vermeiden.



3 Bauteil aus Titan

9	8	7	6	5	4	3	2	1												
									35	$D \times T \times H$ Beispiel: 450 x 63 x 200		1.3.1. Schleifscheibe mit Tragscheibe verklebt	Gruppe 1.3 Auf Tragscheiben befestigte Schleifscheiben							
								36	$D \times T \times H$ Beispiel: 600 x 70 x 20		1.3.2. Schleifscheibe mit Tragscheibe verschraubt									
								37	$D \times T \times W \dots$ Beispiel: 350 x 70 x W 40		1.3.3. Schleifzylinder mit Tragscheibe verschraubt									
								6	$D \times T \times H - W \dots \times E \dots$ Beispiel: 200 x 63 x 76,2 - W 20 x E 20		1.4.1. zylindrischer Schleifkopf	Gruppe 1.4 Topf- und Teilerschleifscheiben								
								11	$D/J \dots \times T \times H - W \dots \times E \dots \times K \dots$ Beispiel: 150/J 114 x 50 x 32 - W 10 X E 13 x K 96		1.4.2. kegiger Schleifkopf									
								12	$D/J \dots \times T/U \times H - W \dots \times E \dots \times K \dots$ Beispiel: 200/J 92 x 32/U 3,2 x 32 - W 10 x E 12 x K 92		1.4.3. Schleifteller									
								27	$D \times U \times H$ Beispiel: 230 x 6 x 22,23		1.5.1. Gekröpfte Schleifscheibe	Gruppe 1.5 Gekröpfte Schleifscheiben								
								28	$D \times U \times H$ Beispiel: 80 x 5 x 13		1.5.2. Gekröpfte Schleifscheibe (Glockenform)									
								3101	$B \times C \times L$		1.6.1. Schleifsegmente	Gruppe 1.6 Schleifsegmente								
								52	$D \times T \times S$ Beispiel: 20 x 20 x 03		1.7.1. Schleifstift (Zylinderform ZY)	Gruppe 1.7 Schleifstifte								
								26	$B \times C \times L$ Beispiel: 50 x 25 x 200		1.8.1. Schleifstäbe, Abziehsteine (Rechteckform)	Gruppe 1.8 Abziehsteine, Schleifstäbe								

Schnittwerte beim Schleifen

Entsprechend dem Schleifwerkzeuggeschwindigkeit und der eingestellten Drehzahl errechnet sich die Schnitt- oder Umfangsgeschwindigkeit v_c (Bild 1) der Schleifscheibe:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}$$

v_c Schnittgeschwindigkeit in m/s
 d_s Durchmesser Schleifscheibe in mm
 n Drehzahl in 1/min

Die für das Schleifwerkzeug zulässige Umfangsgeschwindigkeit $v_{c\max}$ ist von der jeweiligen Bindungsart abhängig und durch einen diagonalen Farbstreifen auf dem Scheibenetikett angegeben.

Die Vorschubgeschwindigkeit v_f wird abhängig vom Schleifverfahren wie folgt bestimmt:

Umfangsplanschleifen

$$v_f = L \cdot n_H$$

L Vorschubweg
 n_H Hubfrequenz in 1/min

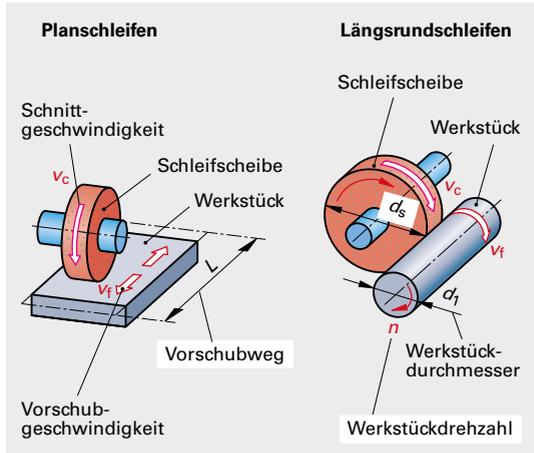
Längsrundschleifen

$$v_f = \pi \cdot d_1 \cdot n$$

d_1 Werkstückdurchmesser
 n Drehzahl des Werkstücks

Das dimensionslose Geschwindigkeitsverhältnis q ist vom zu schleifenden Werkstoff, dem Schleifverfahren bzw. von der sich damit ergebenden Eingriffslänge und von der speziellen Schleifscheibenspezifikation abhängig:

$$q = \frac{v_c}{v_f} = \frac{\text{Schnittgeschwindigkeit } v_c}{\text{Vorschubgeschwindigkeit } v_f}$$



1 Schleifverfahren

Tabelle 1: Farbstreifen für höchstzulässige Umfangsgeschwindigkeiten

Farbstreifen	blau	gelb	rot	grün	grün + gelb	blau + rot	blau + grün
$v_{c\max}$ in m/s	50	63	80	100	125	140	160
Farbstreifen	gelb + rot	gelb + grün	rot + grün	blau + blau	gelb + gelb	rot + rot	grün + grün
$v_{c\max}$ in m/s	180	200	225	250	280	320	360

Klassifizierung der Stahlwerkstoffe in Schleifbarkeitsgruppen:

Gruppe 1, unlegierte, niedriglegierte, ungehärtete Stähle, z. B.: S235, 9S20k, 16MnCr5, C45, 100Cr6

Stähle in dieser Gruppe sind langspanend, setzen aber dem Schleifkorn einen relativ geringen Eingriffswiderstand entgegen. Geeignete Schleifrohstoffe sind unterschiedliche Korundsorten.

Gruppe 2, Hochlegierte, ungehärtete Stähle, z. B. X 12 Cr 13, X 2 CrNiMo18-15-4, X 39Cr 13

Auch diese Stähle sind langspanend und neigen zum Zusetzen der Schleifscheiben. Die Legierungsbestandteile verursachen hohe Schleifkräfte und erfordern hochwertige, harte Schleifmittel. Geeignete Schleifmittel sind einige Edelkorundsorten und Siliziumkarbid.

Gruppe 3, niedriglegierte, gehärtete Stähle, z. B. 16MnCr5, 100Cr6, C45, 34CrMo5

Wegen des martensitischen Härtegefüges und des geringen Anteils an Karbiden, neigen diese Stähle weniger zum Zusetzen der Schleifscheibenstruktur. Sie sind überwiegend mit Edelkorund gut schleifbar.

Gruppe 4, hochlegierte, gehärtete Warm- und Kaltarbeitsstähle,

z. B.: X 155 CrMoV 12-1, X 210CrW 12, X 38CrMoV5-3

Durch den hohen Anteil der Karbidbildner Chrom, Molybdän, Vanadium u. Ä. setzen diese Stähle dem Schleifkorn einen großen Eindringwiderstand entgegen. Sie lassen sich wirtschaftlich nur mit sehr harten Schleifmitteln zerspanen. Geeignete Schleifmittel sind Kubisches Bornitrid, Siliziumkarbid und Einkristallkorund.

Gruppe 5, Schnellarbeitsstähle, z. B.: S 6-5-2-5, S 18-1-2-5

Für HSS-Werkstoffe gilt im Prinzip das Gleiche wie für die Stähle in Gruppe 4. Der Legierungsanteil starker Karbidbildner liegt jedoch deutlich höher, sodass die Schnittkräfte weiter ansteigen. Diesem Effekt begegnet man mit feinerer Körnung, damit sich der Widerstand auf viele Körner gleichmäßig verteilt. Geeignete Schleifmittel sind Kubisches Bornitrid, Siliziumkarbid und Diamant.

Funkenerosives Abtragen

Schaut man sich den Kolben eines alten Pkw-Motors mit hoher Laufleistung an, ist an der oberen Kolbenfläche eine starke Zerstörung der Oberfläche zu sehen, obwohl hier keinerlei Reibung stattfindet. Grund dafür ist das millionenfache Auftreffen des Zündfunken während eines Motorlebens.

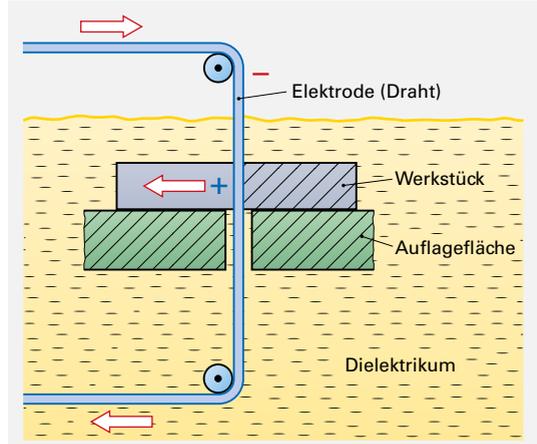
Dieser materialzerstörende Effekt wird beim funkenerosiven Abtragen sinnvoll genutzt. Mit diesem auch **Erodieren** genannten Fertigungsverfahren können alle elektrisch leitenden Werkstoffe geschnitten oder gesenkt werden. Es wird deshalb unterschieden in **funkenerosives Senken** und **funkenerosives Schneiden**. Funkenerosives Schneiden wird auch **Drahterodieren** genannt. Hier ist die Elektrode ein umlaufender Draht, meist aus einer Kupfer-Zink-Legierung. Damit können gehärtete Stähle, aber auch Hartmetalle sehr exakt geschnitten werden (**Bild 1**).

Wie hart der zu bearbeitende Werkstoff oder wie gut dessen Spanbarkeit ist, spielt beim **Erodieren** keine Rolle.

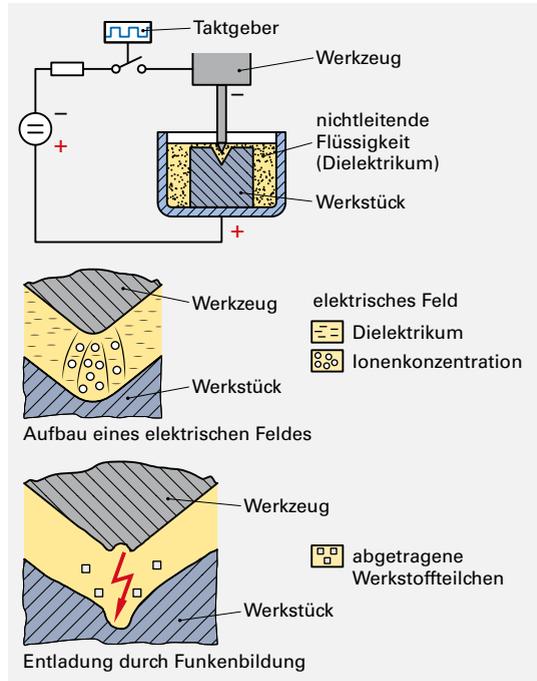
An Werkstück und Werkzeug wird je nach Maschinenausführung eine pulsierende Gleichspannung von 20 V bis 150 V angelegt. Die beiden Metalle werden so zu Elektroden. Zwischen den Elektroden befindet sich eine elektrisch nicht leitende Flüssigkeit (Dielektrikum). Diese Flüssigkeit bewirkt, dass sich ein starkes elektrisches Feld bilden kann, ehe es zur kraftvollen Entladung in Form eines Funkens kommt. Bei dieser Entladung herrschen kurzfristig Temperaturen von bis zu 12000 °C und es werden von beiden Elektroden Werkstoffteilchen geschmolzen und verdampft (**Bild 2**).

Im Werkstück entsteht allmählich eine Gegenform des Werkzeuges. Das Dielektrikum (Mineralöl, entsalztes Wasser) kühlt und spült Werkstoffteilchen davon. Die Stärke des Werkstoffabtrages kann durch Einstellen des Entladungsstromes (bis 100 A) geregelt werden. Je stärker die Stromstärke, umso schlechter wird jedoch die Oberflächengüte. Unter dem Mikroskop sind auf der erodierten Werkstückoberfläche viele kleine Krater zu erkennen. Das ermöglicht Schmierstoffen eine gute Haftung bei gleichmäßiger Oberflächengüte.

Die Nachteile des **Senkerodierens** liegen vor allem in den relativ hohen Werkzeugkosten. Da auch das Werkzeug zerstört wird, muss oft zum Schlichten ein zweites formideales Gegenstück gefertigt werden. Außerdem ist beim Schlichten die Abtragsleistung sehr gering. Wegen des großen Bearbeitungsaufwandes werden diese Verfahren besonders dort eingesetzt, wo die Oberflächenschichten eines Werkstückes möglichst nicht durch Bearbeitungswärme beeinflusst werden dürfen.



1 Prinzip des Drahterodierens



2 Funktionsweise des Erodierens (am Beispiel des funkenerosiven Senkens)

Aufgaben

- 1 Wie kann beim Läppen eine möglichst geringe Rautiefe erreicht werden?
- 2 Weshalb wird das relativ aufwendige Verfahren des funkenerosiven Abtrages angewendet?

Strukturebende Verfahren

Insbesondere die immer höheren Anforderungen an Umweltschutz und Energieeffizienz im Motorenbau haben die Entwicklung strukturebender Verfahren vorangetrieben. Forscher, die sich mit der Reibungslehre, der **Tribologie**, befassen, haben herausgefunden, wie Oberflächen bestenfalls beschaffen sein müssen, um

- hohe Tragfähigkeit der Laufflächen,
- geringen Schmiermittelverbrauch,
- geringen Verschleiß,
- optimierte Laufeigenschaften oder
- eine besondere Haftung zu gewährleisten.

Geeignete Fertigungsverfahren sind:

- Laserhonen,
- Laserstrukturieren,
- Positionshonen,
- Formhonen,
- Beschichten und Honen.

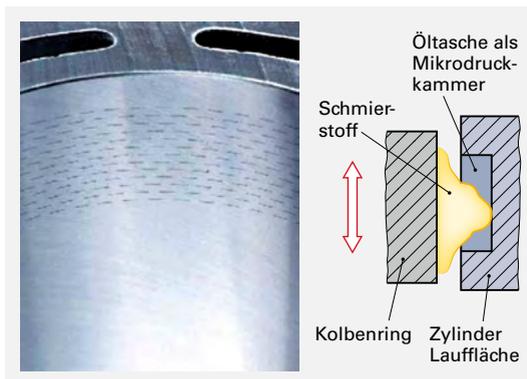
Laserhonen

Bei diesem Feinbearbeitungsverfahren werden mit einem Laser kleine Taschen in die Lauffläche eines tribologischen Systems (z.B. Zylinder und Kolben) eingeschmolzen (**Bild 1**). An den Vertiefungen bilden sich dadurch Schmelz- und Oxydaufwürfe, welche die Ränder unförmig gestalten. Durch anschließendes Entgraten und Honen wird eine Glättung erreicht (**Bilder 2 und 4**).

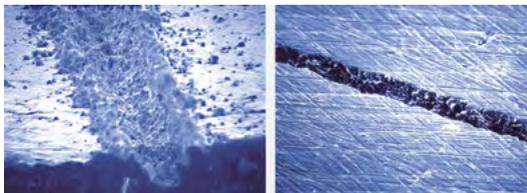
Wegen der spezifischen Eigenschaften des Laserlichts und der kurzen Einwirkdauer erwärmt sich das Werkstück trotz der hohen Temperatur beim Verdampfen des Werkstoffs praktisch nicht. Eigenschaftsänderungen der Oberfläche durch Prozesswärme können damit bei diesem Verfahrensschritt nahezu ausgeschlossen werden. Am Ende der Bearbeitung sind sehr gute Gleitflächen mit einer Rauigkeit von $Rz = 1 \mu\text{m}$ bis $2 \mu\text{m}$ möglich.

Während beim einfachen Honen die Oberflächenstruktur durch die entstehenden Riefen eher zufällig entsteht und damit nicht optimal gestaltet werden kann, werden die Lage, Tiefe und Struktur der Taschen beim Laserhonen durch eine NC-Steuerung genau nach den technologischen Vorgaben hergestellt.

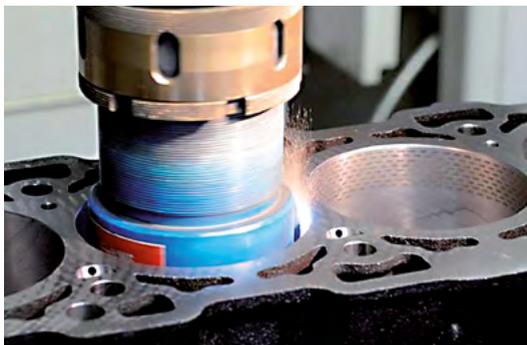
Weil sich in den Taschen der Schmierstoff ansammeln kann, erreicht man wesentlich bessere Gleiteigenschaften bei geringerem Verschleiß und eine höhere Lebensdauer durch eine deutliche Reduzierung der Reibkräfte zwischen den Gleitflächen.



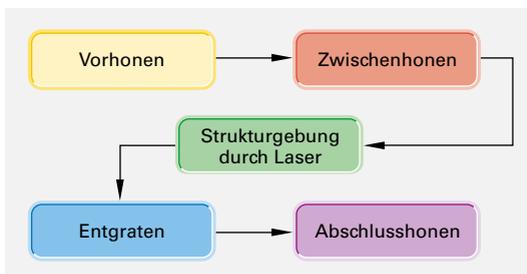
1 Lauffläche eines Zylinders nach dem Laserhonen



2 Oberflächenstruktur nach Laserbehandlung (links) und anschließendem Honen (rechts)



3 Laserbearbeitung eines Motorblocks



4 Verfahrensschritte beim Laserhonen

Messanordnungen

Mechanische Messanordnung

Bei mechanischen Messanordnungen wird die mechanische Veränderung am Messgegenstand vom Messgrößenaufnehmer aufgenommen und über Übersetzungsglieder auf einen Zeiger übertragen. In den gesamten Vorgang sind nur mechanische Bauglieder einbezogen.

Eine typische Anwendung der mechanischen Messanordnung ist der mechanische Feinzeiger (**Bild 1**). Ein Mangel der mechanischen Messanordnung ist der begrenzte Messbereich, da auf mechanischem Weg nicht beliebig übersetzt werden kann. Da dieser Messbereich teilweise nur 0,05 mm beträgt, werden diese Geräte vor allem zu Unterschiedsmessungen verwendet. Sie dienen auch zum Bestimmen von Parallelität und Ebenheit von Flächen oder zum Rundlauf von Wellen.

Der **Vorteil der mechanischen Messanordnung** besteht darin, dass sie von der Zufuhr anderer Energiequellen unabhängig ist.

Elektrische Messanordnung

Bei der elektrischen Messanordnung wird die durch den Messgrößenaufnehmer aufgenommene Längenänderung durch Messgrößenwandler in elektrische Größen (**Bild 2**) umgewandelt.

Beim induktiven Messtaster ist der Taster (**Bild 2**) mit dem Eisenkern verbunden, der innerhalb zweier Spulen beweglich angeordnet ist. Die Bewegung des Tasters und damit die des Eisenkerns verändert die Spannung in den Spulen. Das elektrische Signal wird verstärkt und angezeigt.

Die **Vorteile der elektrischen Messanordnung** sind

- der große Messbereich,
- die hohe Messgenauigkeit,
- die leichte Erfassung und Nutzung der Daten in Rechnern bzw. Steuerungen.

Pneumatische Messanordnung

Bei der pneumatischen Messanordnung werden die Längenänderungen in Druckdifferenzen oder die Veränderung einer durchfließenden Volumenmenge umgewandelt.

Nach dem angewendeten Messprinzip wird zwischen Differenz- oder Druckmessverfahren bzw. Volumenmessverfahren unterschieden (**Bild 3**).

Druckmessverfahren

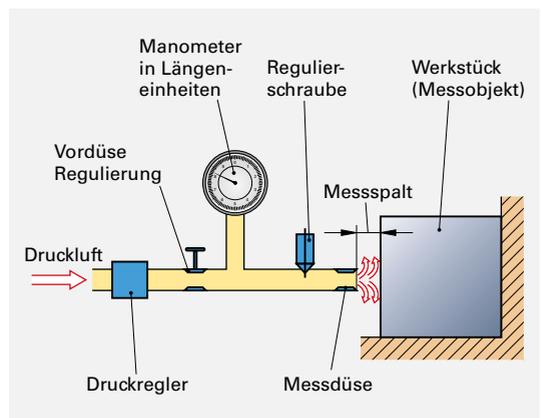
Abhängig von der Werkstückgröße ändert sich die Größe des Messspaltes. Die entstehende Druckänderung wird im Manometer in eine Längsanzeige umgewandelt. Gerätejustierung vor jeder Prüfung.



1 Millimess-Feinzeiger



2 Elektronisches Messgerät mit induktivem Messtaster



3 Druckmessverfahren

Volumenmessverfahren

Bei diesem Verfahren werden die Veränderungen in der Durchflussmenge, die durch die Abstandsänderung Düse-Werkstück entstehen, registriert. Ein kleinerer Messspalt bewirkt eine kleinere Durchflussmenge und damit ein Senken des Schwebekörpers. An einer Skala kann die Größe des Werkstückes abgelesen werden. Eine genaue Einstellung des Gerätes vor der Messung ist nötig. Das Volumenmessverfahren wird vor allem angewendet, wenn größere Stückzahlen zu messen sind (**Bild 1**).

Es kann auch an mehreren Messpunkten gemessen werden (**Bild 2**).

Das **Druckmessverfahren** erlaubt demgegenüber größere Messbereiche und höhere Messdrücke.

Die **Vorteile der pneumatischen Messanordnung** liegen in

- dem berührungslosen oder berührungsarmen Messen, wodurch es zu keinen Beschädigungen (Kratzer u.a.) kommt,
- der reinigenden Wirkung der ausströmenden Luft (Schmutz, Öl und Spanpartikel werden weggeblasen),
- der hohen Messgenauigkeit.

Der Messbereich ist allerdings sehr klein (0,01 mm bis 1 mm), deshalb erfolgt nur Unterschiedsmessung.

Das Messen kann berührungslos oder über mechanische Berührung erfolgen (**Bild 3**). Das berührungslose Messen erfolgt in der Regel nur bis zu einer Oberflächenrauheit von 3 μm .

Die Vorteile des *berührungslosen Messens* sind:

- es entstehen keine Beschädigungen am Werkstück,
- Späne und Verunreinigungen werden weggeblasen.

Beim *Kontaktmessen* wird das Werkstück berührt.

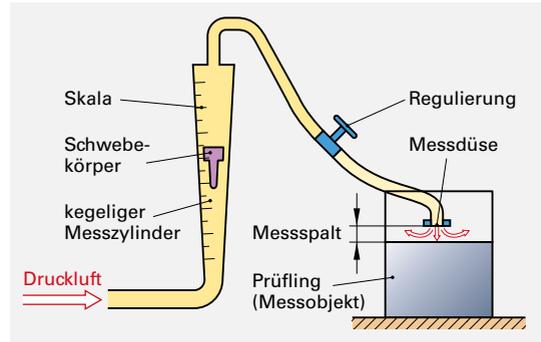
Es muss angewendet werden, wenn größere Rauigkeiten (> 3 μm) am Werkstück vorliegen.

Optische Messanordnung

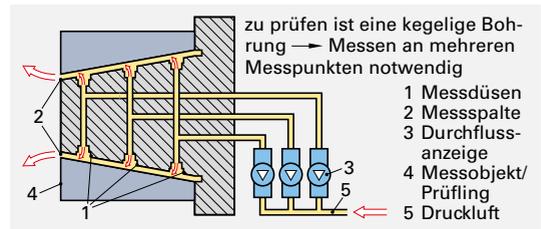
Optische Messanordnungen werden an CNC-Maschinen in den Wegmesssystemen verwendet.

Koordinatenmessmaschinen

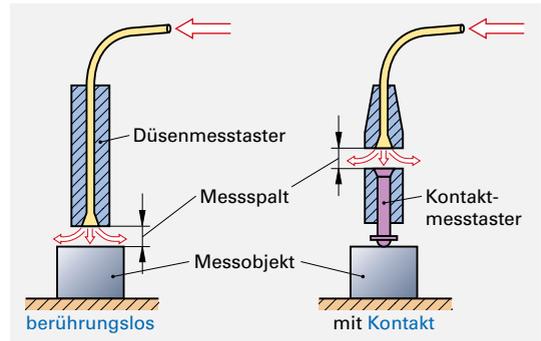
Wenn komplizierte Werkstücke mit einfachen Messmitteln nicht mehr gemessen werden können, kommen Koordinatenmessmaschinen zum Einsatz. Sie messen in drei Achsen und arbeiten wie CNC-Maschinen (**Bild 4**). Das Werkzeug wird durch einen Taster ersetzt, der die Messwerte aufnimmt und an den Rechner weiterleitet.



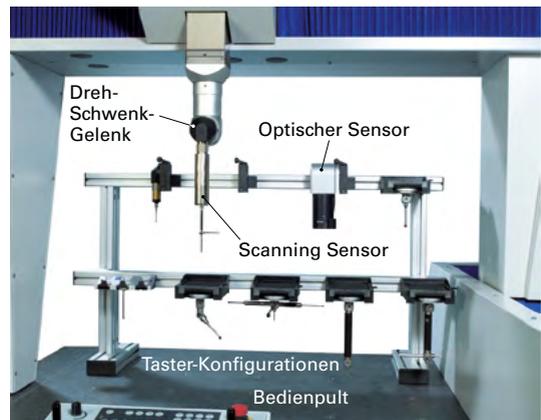
1 Volumenmessverfahren



2 Messen an mehreren Messpunkten



3 Messgrößenaufnehmer



4 Koordinatenmessmaschine mit Multisensorik

...	Außenkontur	
N09	G97 F1250 S3980 T02 M06	;Werkzeugaufruf Schaftfräser d = 16 mm
N10	G00 X120 Y-40 Z2	
N11	G00 Z-4.25 M13	;Zustellen 1. Schnitt
N12	G22 L2002 H1	;Aufruf Unterprogramm
N13	G00 Z-8.5	;Zustellen 2. Schnitt
N14	G22 L2002 H1	;Aufruf Unterprogramm
N15	G00 Z-12.75	;Zustellen 3. Schnitt
N16	G22 L2002 H1	;Aufruf Unterprogramm
N17	G00 Z-17	;Zustellen 4. Schnitt
N18	G22 L2002 H1	;Aufruf Unterprogramm
N19	F800 T02 TC2 M06	;Werkzeugaufruf zum Schlichten
N20	G23 N17 N18 H1	;Programmteil-Wiederholung
N21	G00 Z2 M09	
...		

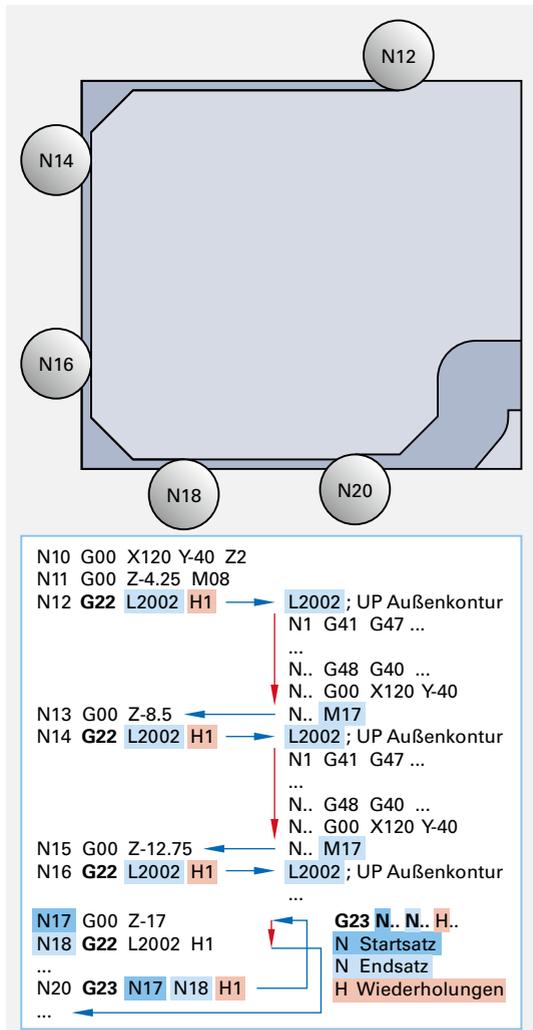
Unterprogramme

Häufig vorkommende Bearbeitungsfolgen, die vom Steuerungshersteller nicht vorprogrammiert wurden, kann der Maschinenbediener selbst durch Unterprogramme beschreiben. Unterprogramme können **feste Werte** oder **Parameter** (Variablen) enthalten. Sie werden vom Hauptprogramm aus durch Angabe des Adressbuchstaben L aufgerufen. Anschließend wird nach dem Adressbuchstaben H die Anzahl der Durchläufe angegeben (**Bild 1**). Nach dem Abarbeiten eines Unterprogramms und dem Lesen der Anweisung **M17** setzt die Steuerung die Bearbeitung mit dem nächsten Satz des Hauptprogramms fort.

Im Beispiel wird die **Außenkontur** in vier Schnitten vorgeschruppt und abschließend nach dem Aufruf eines neuen Werkzeugradius aus dem Korrekturspeicher und eines reduzierten Vorschubes geschlichtet. Dieser Fertigungsablauf wird mithilfe eines Unterprogramms realisiert. Das Programm enthält zunächst feste Koordinatenwerte. Start- und Endpunkt der Konturbeschreibung im Unterprogramm sind identisch. Im Hauptprogramm werden lediglich die Werkzeugaufrufe und die Zustellung für den jeweiligen Schnitt realisiert.

Der Einsatz von Unterprogrammen ermöglicht eine Modularisierung von CNC-Programmen. Der Programmieraufwand reduziert sich erheblich. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Programmverwaltung und -dokumentation.

Der Aufruf der Wegbedingung **G23** ermöglicht die Wiederholung eines an anderer Stelle beschriebenen Programmteils (**Bild 1**). Auch die Verwendung dieser Anweisung reduziert den Schreibaufwand beim Programmieren und erhöht gleichzeitig den Dokumentationsbedarf.



1 Programmablauf in Haupt- und Unterprogramm und Prinzip der Programmteil-Wiederholung

Testen und Abarbeiten des Programms

Hat der Bediener das CNC-Programm nicht an der Maschine erstellt, muss er es zunächst aus der Programmverwaltung abrufen und auf die entsprechende CNC-Maschine übertragen.

Das CNC-Programm muss in der Steuerung aktiviert werden, bevor es getestet und abgearbeitet werden kann.

Moderne CNC-Steuerungen ermöglichen eine Simulation des Bearbeitungsablaufs mit Darstellung des Werkzeugs und des Werkstücks unter Berücksichtigung einer Kollisionskontrolle. Durch die Auswahl verschiedener Zoomstufen, dem Einzelsatz, von Restmaterial usw. können interessante Details angezeigt und überprüft werden (**Bild 1**).

Nach der erfolgreich simulierten Fertigungskontrolle kann die Programmabarbeitung erfolgen. Bei der erstmaligen Fertigung mit dem CNC-Programm empfiehlt sich der Einzelsatzmodus und, wenn möglich, ein reduzierter Eilgang bzw. Vorschub. Weist das CNC-Programm Mängel auf, z. B. falsche Schnittwerte, kann das Programm direkt an der Maschine optimiert werden. Nach Störungen, wie z. B. Werkzeugbruch, kann das Programm, nach Beheben der Störung, an der entsprechenden Stelle fortgesetzt werden. Aufgrund der komplexen Bewegungsabläufe, z. B. Schwenken oder Drehen des Rundtisches, ist bei der 5-Achs-Bearbeitung die Kollisionskontrolle noch wichtiger als im klassischen 2D-Bereich.

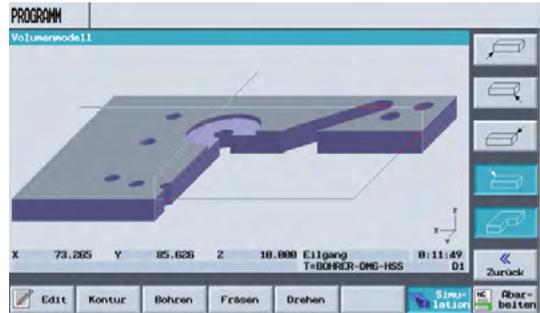
Virtuelle Maschinen

Diese Simulationssoftware bildet komplette Bearbeitungsprozesse ab (**Bild 2**). Sie prüft virtuell die Realisierbarkeit der einzelnen Arbeitsschritte und trägt durch deren Visualisierung, Prüfung und Optimierung zur Erhöhung der Prozesssicherheit der Fertigungsabläufe bei (**Bild 3**).

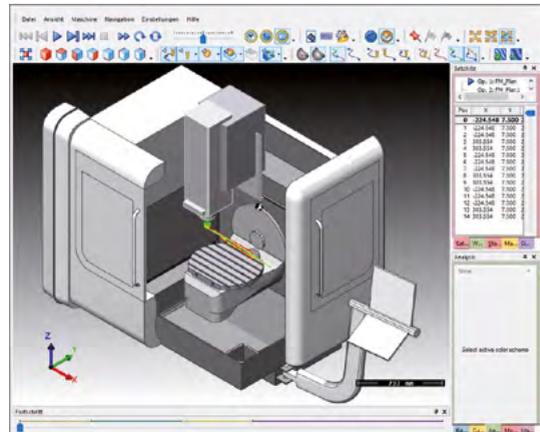
Für die Simulation müssen genaue Zeichnungen der Maschine mit allen beweglichen Teilen, der Werkzeugspannmittel und der Werkstückspannmittel zur Verfügung stehen.

Neben dem Fertigungsergebnis können auch drohende Kollisionen zwischen Werkzeug und Werkstück bzw. Spannmittel oder Maschinentisch erkannt werden.

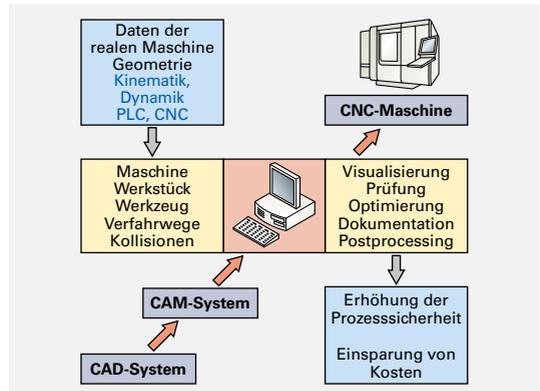
Des Weiteren kann jeder Werkzeugwechsel überprüft werden, genauso wie die auftretenden Drehzahlen und Vorschubgeschwindigkeiten. Auch eine Voraussage über die zu erwartende Fertigungszeit lässt sich mit einem Simulationslauf einer virtuellen Maschine treffen.



1 Simulation eines CNC-Programms



2 Virtuelle Überprüfung



3 Einordnung der virtuellen Maschine

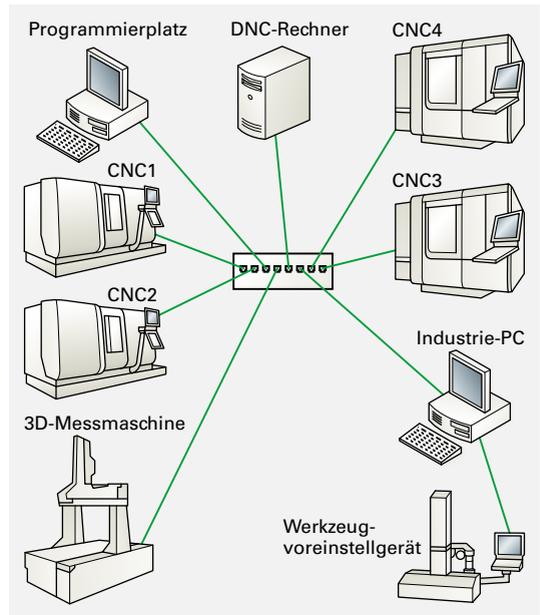
Kommunikation in der Fertigung

In der modernen Fertigung besteht die Notwendigkeit eines permanenten **Informationsaustauschs**. Deshalb sind in vielen Unternehmen die Steuerungen der CNC-Maschinen mit einem Rechner verbunden, der als zentraler Datenspeicher fungiert. Gegebenenfalls sind auch vorhandene Werkzeugvoreinstellgeräte oder Koordinaten-Messmaschinen in das Netzwerk eingebunden (**Bild 1**). Dieses Konzept hat die Bezeichnung Distributed Numerical Control (**DNC**).

Ursprünglich heißt das Konzept Direct Numerical Control. Es wurde entwickelt, als numerische Steuerungen keine eigenen internen Datenspeicher besaßen, und diente ursprünglich der zeitgerechten Verteilung von Steuerinformationen an mehrere Maschinen und dem Ersatz von Wechseldatenträgern sowie ihren Eingabe- und Ausgabegeräten durch direkte Datenübertragung. Moderne DNC-Systeme leisten jedoch wesentlich mehr (**Tabelle 1**).

Die **Datenverwaltung** ist in der Lage, ein Archiv von mehreren tausend Teileprogrammen sicher zu verwalten und zu klassifizieren. Sie ermöglicht eine termintreue und sichere Bereitstellung bzw. Verteilung der benötigten Programme. Das DNC-System organisiert die Übertragung der Daten zwischen dem Zentralrechner, den einzelnen Steuerungen und anderen angeschlossenen Einheiten über die erforderlichen Schnittstellen und Protokolle. Über das **NC-Programmiersystem** kann auf die zentral gespeicherten Programme zugegriffen werden, um erforderliche Änderungen durchführen zu können. Entstehende Betriebsdaten der angeschlossenen Maschinen werden permanent über das **DNC-System** erfasst und zur Auswertung bereitgestellt. Innerhalb flexibler Fertigungssysteme sind Bearbeitungsmaschinen durch Werkstücktransporteinrichtungen miteinander verkettet. Dafür ist das DNC-System eine wichtige Voraussetzung. Das Ausnutzen moderner Kommunikationstechnologien ermöglicht die Einbindung von Endgeräten der Mitarbeiter zwecks Überwachung der automatischen Fertigung und Benachrichtigung bei Fehlfunktionen. Damit ist das DNC-System (**Bild 2**) ein wichtiger Baustein zur Erhebung und Verkettung von Daten nach Industrie 4.0 (siehe S. 539).

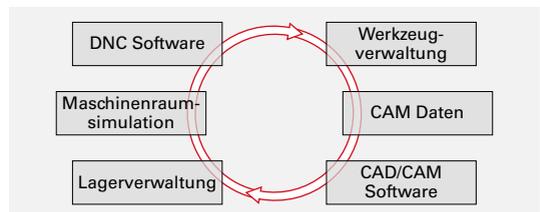
Ist das Werkzeugvoreinstellgerät in das DNC-Netzwerk integriert, können die Messgrößen für jedes Werkzeug im Zentralrechner gespeichert werden. Ergänzt durch Angaben über den Aufbau der Werkzeuge, über Schneidstoffe, zugehörige Spannmittel, Schnittdaten, Ersatzteile usw. entsteht eine Menge von Informationen, die in einer Werkzeugdatenbank strukturiert gespeichert werden und auf die über eine Benutzeroberfläche jederzeit zugegriffen werden kann (**Bild 3**).



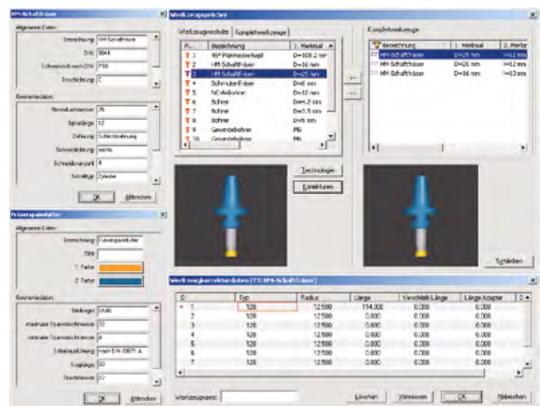
1 DNC-Netzwerk

Tabelle 1: Aufgaben eines DNC-Systems

DNC-System	
Materialfluss steuern	Daten verwalten
Maschinen überwachen	Daten verteilen
Betriebsdaten erfassen	Daten übertragen



2 DNC-Einbindung in Industrie 4.0



3 Benutzeroberfläche der Werkzeugdatenbank