

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

Dambacher, Michael; Dipl.-Ing., StD	Aalen
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

2. Auflage 2024

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-7585-1372-5

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

© 2024 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.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: UAB BALTO print, 08217 Vilnius (LT)

Vorwort

Das Lehrbuch „Fachkunde Zerspantechnik“ bildet in ausführlicher Form die gesamten Lerninhalte der Zerspantechnik in der Grund- und Fachstufe entsprechend dem Rahmenlehrplan des Bundes und der Ausbildungsordnung zum Zerspanungsmechaniker ab. Die vorliegende zweite Auflage wurde komplett überarbeitet, ergänzt und aktualisiert.

Im Kapitel Fertigungstechnik wird das gesamte Gebiet der industriellen Fertigung in Anlehnung an die DIN 8580 anschaulich und übersichtlich aufgearbeitet und mit lernfeldorientierten Fertigungsbeispielen praxisnah dargestellt.

Das Buch vermittelt den Lehrstoff in der beruflichen Ausbildung wie auch der Weiterbildung. Die Erarbeitung des Lernstoffs wird durch sehr viele Zeichnungen und Bilder lebendig und motivierend unterstützt. Alle Bilder und Tabellen stehen im digitalen Medienregal EUROPATHEK zur Verfügung (Infos dazu siehe Umschlaginnenseite).

Das Fachkundebuch wird durch das „Tabellenbuch Zerspantechnik“ anwendungsbezogen ergänzt und erweitert. Dort finden Lernende und Lehrende in Ausbildung, Beruf und Weiterbildung Größengleichungen, Formeln, Diagramme, Tabellenwerte und Bearbeitungstechnologien, die zum Verständnis und zur Beurteilung von technischen Grundlagen und angewandten Fertigungsverfahren notwendig sind. In beiden Büchern sind die relevanten Themen aus Physik, Mathematik, Werkstofftechnik, Elektrotechnik, Mechanik, Festigkeitslehre, Fertigungs- und Maschinentechnik, Steuerungs- und CNC-Technik sowie Qualitätstechnik ebenso zu finden wie Hinweise auf Zeichnungsnormen, Arbeits- und Umweltschutz, Produktivität, Wirtschaftlichkeit, Betriebsstoffe und Wartung von Maschinen und Anlagen. Damit ist diese Buchreihe neben der beruflichen Ausbildung auch für Meister, Techniker und Ingenieure in der praktischen Umsetzung und Anwendung besonders geeignet, da die ausführlichen Darstellungen der Themengebiete zu Lösungen von praxisorientierten Aufgabenstellungen führen.

Wir freuen uns über Hinweise und Anregungen aus unserer Leserschaft zur Weiterentwicklung und Verbesserung des Fachkundebuchs zur Zerspantechnik unter lektorat@europa-lehrmittel.de.

Autoren und Verlag

Frühjahr 2024

A	Arbeits- und Umweltschutz	11 bis 28
G	Grundlagen	29 bis 53
W	Werkstofftechnik	54 bis 96
F	Fertigungstechnik	97 bis 359
B	Betriebstechnik	360 bis 413
Q	Produktionsplanung und Qualitätsmanagement	414 bis 484
S	Steuerungs- und Regelungstechnik	485 bis 585

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

Energieeinsparung	25
Abfälle und Kreislaufwirtschaft	26

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 FESTIGKEITSLERE 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
--	----

W2 STAHLWERKSTOFFE 55

Stahlerzeugende Industrie	55
Stähle für den Stahlbau	56
Stähle für den Maschinenbau	56
Stähle für den Druckbehälterbau	57
Einsatzstähle	57
Vergütungsstähle	57
Nitrierstähle	57
Automatenstähle	58
Hochlegierte korrosionsbeständige Stähle	58
Warmfeste Stähle	58
Warm- und Kaltarbeitsstähle	59
Federstähle	59
AFP-Stähle	59
Stahlnormung	60
Normung der Schnellarbeitsstähle	61

W3 GUSSEISENWERKSTOFFE 62

Gusseisen mit Lamellengraphit	62
Gusseisen mit Kugelgraphit	62
Temperguss	63
Gusseisen mit Vermiculargraphit	63
Hartguss	64

Austenitisches Gusseisen	64
Stahlguss	64

W4 NICHTEISENMETALLE 65

Aluminium	65
Aluminiumlegierungen	65
Bezeichnungssystem Aluminiumlegierungen	66
Aushärtung	66
Kupferlegierungen	67
Bezeichnungssystem Kupferlegierungen	67
Magnesiumlegierungen	68
Nickelbasislegierungen	68
Titanlegierungen	68

W5 SINTERMETALLE 69

W6 KUNSTSTOFFE 70

Einteilung der Kunststoffe	70
Thermoplaste	70
Duroplaste	71

W7 WERKSTOFFPRÜFTECHNIK 72

Werkstoffprüfung metallischer Werkstoff durch zerstörende Prüfverfahren	72
Zugversuch	72
Druckversuch	74
Kerbschlagbiegeversuch	74
Prüfung der Dauerschwingfestigkeit	74
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	77
Werkstoffprüfung von Kunststoffen	78
Zugprüfung	78
Härteprüfung	78

W8 WÄRMEBEHANDLUNG VON EISENWERKSTOFFEN 79

Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	79
Wärmebehandlungsverfahren	80
Glühverfahren der Eisenwerkstoffe	81
Weichglühen	81
Normalglühen	81
Spannungsarmglühen	81
Diffusionsglühen	82
Grobkornglühen	82
GKZ- Glühen	82
Rekristallisationsglühen	82
Anlassen	82
Härteverfahren für Stahlwerkstoffe	83
Umwandlungshärteverfahren	83
Vergüten	84
Diffusionshärteverfahren	84
Einsatzhärten	84
Carbonitrieren	85
Nitrieren	85
Vakuumhärten	85

W9 HALBZEUGE 86

Stahlprofile (Auswahl)	86
Aluminiumprofile (Auswahl)	86
Herstellung von Halbzeugen	87
Stahlerschmelzung	87
Strangguss	87
Warmwalzen	87
Kaltwalzen	87
Kaltziehen	87
Strangpressen	88

W10 ZERSPANBARKEIT 89

Technologische Beschreibung	89
Zerspanbarkeit der Stahlwerkstoffe	89
Legierter Stahl	90
Nichtrostende Stähle	91
Gusseisenwerkstoffe	92
Schwer zerspanbare Werkstoffe	93
Nickel- und Nickelbasislegierungen	93
Graphit	93
Bearbeitung harter Eisenwerkstoffe	94
Aluminium-Legierungen	95
Kunststoffe	96
Verbundwerkstoffe (Composites)	96

F FERTIGUNGSTECHNIK

F1 GRUNDLAGEN DER ZERSPANTECHNIK 97

Historischer Rückblick	97
Zerspanverfahren	99
Zerspanungsprinzip	101
Spannungsbewegungen	101
Spanungsgeschwindigkeit	102
Schnitt- und Spanungsgrößen	105
Spanbildung	108
Spandickenstauchung λ_h	108
Spangeschwindigkeit v_{sp}	109
Scherwinkel Φ	109
Spanflächenreibwert μ_{sp}	109
Einfluss der Reibung auf die Spanbildung	110
Spanformen	111
Spanformdiagramm	111
Einflüsse auf die Spanformung	112
Zerspankräfte	113
Zerspankraftkomponenten	113
Spezifische Schnittkraft k_c	114
Schnittkraftberechnung	115
Einflussgrößen auf die Zerspankraft	116
Spanungsarbeit	117
Zerspanungsleistung	117
Schnittleistung	117
Maschinenleistung	118
Schnittmoment	118

Standkriterien des Werkzeugs	119	Drall- und Schneidrichtung	179
Standzeit	119	Besondere Fräsverfahren	180
Standweg L_f	119	Maschinengestelle für Fräsmaschinen	183
Standmenge	120	Bauformen von Fräsmaschinen	185
Ermittlung der Standzeit	120	Fräsmaschinen mit horizontaler Bearbeitungsachse	185
Standzeitgerade	120	Fräsmaschinen mit vertikaler Bearbeitungsachse ...	186
Einflüsse auf die Standzeit	122	Aktuelle Technologien	187
Energiebilanz	122	Fertigungsbeispiel „Führungsschieber“	188
Werkzeugverschleiß	123		
Verschleißursachen	124	F7 DREHTECHNIK	196
Verschleißformen	125	Allgemeines	196
Schneidengeometrie	126	Schnittgrößen beim Drehen	197
		Winkel am Drehwerkzeug	199
F2 SCHNEIDSTOFFE UND BESCHICHTUNGEN	128	Innenausdrehen	203
Übersicht	128	Abstech- und Einstechdrehen	204
Schneidstoffeigenschaften	129	Besondere Drehverfahren	206
Schnellarbeitsstähle	130	Fertigungsbeispiel „Bolzen“	209
Hartmetalle	132	Fertigungsbeispiel „Kegelhülse“	213
Cermets	133	Fertigungsbeispiel „Flanschring“	218
Keramische Schneidstoffe	134	Fertigungsbeispiel „Antriebswelle“	222
Kubisches Bornitrid, BN (CBN)	136	Fertigungssimulation CNC- Programm Antriebswelle ..	225
Diamant	137	Fertigungsbeispiel „Getriebewelle“	228
Auswahlkriterien für Schneidstoffe	138		
Klassifizierung der Schneidstoffe	140	F8 AUTOMATENDREHTECHNIK	233
		Fertigungskriterien	233
F3 BOHRVERFAHREN	143	Drehautomaten	233
Bohren und Senken	143		
Bohren ins Volle	144	F9 GEWINDEHERSTELLUNG	236
Schnittbedingungen	147	Gewindearten	236
Prozesskenngößen	148	Gewindeherstellverfahren	236
Bohrwerkzeuge	152	Gewindebohren	236
Kurzbohrer	152	Gewindeformen	239
Wendelbohrer	152	Außengewinde handgeführt schneiden	239
Profilbohren	154	Innengewindefräsen	240
Tiefbohren	156	Gewindedrehfräsen	242
Aussteuerwerkzeuge	161	Gewindewirbeln	243
Senken	162	Gewindedrehen	243
Plansenken	163	Gewinderollen	247
		Gewindewalzen	247
F4 REIBEN	164		
Rundreiben	164	F10 RÄUMEN, HOBELN UND STOSSEN	248
		Räumen	248
F5 SÄGEN	166	Hobeln und Stoßen	250
Sägeverfahren	166		
Sägeblätter	166	F11 SCHLEIFTECHNIK	251
Automatische Bandsäge	167	Schleifen	251
		Einteilung der Schleifverfahren	252
F6 FRÄSTECHNIK	168	Schleifprozess	253
Einteilung der Fräsverfahren	168	Kühlschmierung	254
Schnittgrößen beim Fräsen	170	Zerspanungsvorgang und Zerspanungsgrößen	255
Fräswerkzeuge	176	Schleifmittel	257
Teilung am Fräswerkzeug	178		
Störungsbeseitigung beim Fräsen	179		

Schleifmittelbindung	260
Härte und Gefüge	261
Schleiftechnisches Grundprinzip	262
Schnittwerte beim Schleifen	264
Schnittkraft und Schnittleistung beim Schleifen	265
Werkzeugverschleiß beim Schleifen	266
Auswuchten von Schleifkörpern	269
Betriebssicherheit beim Schleifen	270
Rundschleifen	271
Rundschleifverfahren	271
Fertigungsbeispiel „Führungshülse“	272
Fertigungsbeispiel „Grundplatte“	278
Zeitspannvolumen Q	279

F12 FEINBEARBEITUNGSVERFAHREN 280

Umformende Feinbearbeitungsverfahren	280
Abtragende Feinbearbeitung	281
Elektrochemisches Abtragen	282
Honen	283
Läppen	285
Ultraschallschwingläppen	287
Strukturgebende Verfahren	288
Lasershonen	288
Abtragende Verfahren	289
Thermisches Abtragen	289
Funkenerosives Abtragen	292
Erosives Abtragen durch Flüssigkeit	293
Chemisches Abtragen	293
Elektrochemisches Abtragen (ECM)	293
Beschichtungstechnik metallischer Oberflächen	294
Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen HVOF	294
Lichtbogenspritzen	294
Flammspritzen	294
Beschichten von Schneidplatten	295
Auftragsschweißen	295
Feuerverzinken	295
Galvanisieren	295
Blechbearbeitung	296
Stanzen	296
Scherschneiden	296
Nibbeln	297
Feinschneiden	297
Folgeschneiden	297

F13 FÜGEVERFAHREN 298

Press- und Schnappverbindungen	301
Pressverbindungen	301
Schnappverbindungen	302
Kleben	303
Löten	305
Grundlagen des Lötens	305
Lötverfahren	307
Lote	308
Flussmittel	309

Thermisches Fügen	310
Pressschweißen	310
Elektrisches Widerstandspressschweißen	310
Abbreinstumpfschweißen	311
Punktschweißen	311
Buckelschweißen	311
Rollennahtschweißen	311
Pressschweißen durch Bewegungsenergie	312
Sprengschweißen	312
Magnetimpulsschweißen	313
Pressschweißen durch elektrische Gasentladung	313
Lichtbogenbolzenschweißen	313
Schmelz-Verbindungsschweißen	313
Verbindungsschweißen durch Gas	314
Verbindungsschweißen durch elektrische Gasentladung	314
Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	314
Metall-Schutzgasschweißen	315
Unterpulverschweißen (UP)	315
Metall-Lichtbogenschweißen	315
Verbindungsschweißen durch Strahl	316
Elektronenstrahlschweißen	316
Laserschweißen	316
Lötverbindungen	316
Verfahrensvergleich	317

F14 ZERSPANUNGSTECHNOLOGIE 318

Fertigungstechnische Entwicklungstrends	318
Hochgeschwindigkeitsbearbeitung – HSC	319
Merkmale der HSC-Technologie	319
Technologischer Hintergrund	320
Bearbeitungsstrategien	321
Maschinentechnologie	323
Antriebskonzepte	324
HSC-Werkzeuge	325
Werkzeugaufnahme	326
Unwucht rotierender Systeme	327
Bearbeitung harter Werkstoffe	329
Schneidstoffe zur Hartbearbeitung	330
Minimalmengenschmierung	332
Trockenbearbeitung	334

F15 FERTIGUNGSVERFAHREN 336

Die Optimierung von Fertigungsabläufen	338
Urformen	340
Urformen mit formgebendem Werkzeug aus dem flüssigen Zustand, Gießen	340
Der prinzipielle Verfahrensablauf beim Gießen	341
Erstarrungsvorgänge	341
Gießverfahren	342
Gießen in verlorenen Formen	342
Gießen mit Dauerformen	342
Gießen mit Dauerformen und ohne Modell	345

Urformen mit formgebendem Werkzeug aus dem breiigen Zustand	347
Urformen mit formgebendem Werkzeug aus dem pulverförmigen Zustand	348
Umformtechnik	350
Verhalten der Werkstoffe beim Umformen	351
Druckumformen	352
Biegeumformen	354
Festlegung der gestreckten Länge	354
Biegeradius	355
Additive Fertigungsverfahren	356
Stereolithographie (SL)	357
Solid Ground Curing (SGC)	357
Selective Laser Sintering (SLS)	358
3D-Printing (3DP)	358
Fused Deposition Modelling (FDM)	359
Layer Objekt Manufacturing (LOM)	359
Abformverfahren und Folgeprozesse	359

B BETRIEBSTECHNIK

B1 WARTUNG UND INSTANDHALTUNG 360

Wartung	360
Inspektion	362
Instandsetzung	363
Verbesserung	364
Steigerung der Qualitätsefähigkeit	365

B2 BETRIEBSSTOFFE 367

Schmierstoffe	367
Schmierstoffarten	368
Schmierfette	368
Schmieröle	369
Festschmierstoffe	370
Kühlschmierstoffe KSS	370
Aufbereitung und Entsorgung von Kühlschmierstoffen	373

B3 WERKZEUGMASCHINEN 374

Die Werkzeugmaschine als technisches System und Produktionsfaktor	374
Einteilung der Werkzeugmaschinen nach den Fertigungsverfahren	375
Bohrmaschinen	376
Drehmaschinen	377
Fräsmaschinen	381
Schleifmaschinen	384
Sondermaschinen	386
Abtragende Maschinen	386
Funktionseinheiten einer Werkzeugmaschine	387
Antriebseinheiten einer Werkzeugmaschine	388
Energieübertragungseinheit (Getriebe)	392
Energieübertragungseinheit Vorschubantrieb	393
Stütz- und Trageeinheit	396
Sicherheitseinrichtungen an einer Werkzeugmaschine	397
Betriebsicherheit von Werkzeugmaschinen	397

B4 SPANNTECHNIK 398

Maschinenschraubstock	398
Werkzeugspanntechnik	398
Werkstückspanntechnik	403

B5 ANSCHLAGMITTEL 408

Anschlagketten	408
Anschlagseile	411
Hebebänder und Rundschlingen	413

Q PRODUKTIONSPLANUNG UND QUALITÄTSMANAGEMENT

Q1 PRODUKTIONSPLANUNG UND PRODUKTIONSSTEUERUNG 414

Planung des Produktionsprozesses	414
Fertigungssteuerung	417
Ermittlung der Auftragszeit	418
Kostenrechnung	419
Kostenstellenrechnung	419
Kostenträgerrechnung	421
Herstellung eines Komplettbearbeitungswerkzeugs Beispiel für einen betrieblichen Prozess	422
Kundenauftrag	422
Projektierung	422
Betriebliche Leistungsprozesse	423

Q2 QUALITÄTSMANAGEMENT 428

Zielsetzung	428
Qualität	428
Qualitätskreis	429
Qualitätsmanagementsysteme	430
Prozessorientierung	430
Komponenten des Qualitätsmanagements	431
Qualitätssicherung (Qualitätsprüfung)	432
Prüfmittelüberwachung	433
Prüfdokumentation und Datensicherung	435
Kundenorientierung	436
Qualitätssicherung in der Fertigung	437
Untersuchung der Maschinenfähigkeit	437
Ermittlung der Maschinenfähigkeit	439
Untersuchung der Prozessfähigkeit	441
Statistisches Qualitätsmanagement	442
Grundlagen des statistischen Qualitätsmanagements	442
Qualitätsregelkarten als Instrumente der Fertigungsüberwachung	443
Robuste Prozesse	446
Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	446
Zertifizierung als ein Ziel des Qualitätsmanagements	447
Umweltmanagement	448

Q3 PRÜFTECHNIK 449

Die Entwicklung der Prüftechnik 449

 Begriffe der Messtechnik 451

 Messanordnungen 453

 Messabweichungen 455

Prüfen von Maßen, Formen und Lagen 456

Maßliches Prüfen mit Lehren 458

 Form- und Lagetoleranzen 459

Prüfen von Oberflächen 465

 Grundbegriffe 465

 Gestaltabweichungen 465

 Rauheitsmessgrößen 466

 Oberflächenprüfverfahren 466

Toleranzen und Passungen 468

 Grundbegriffe 468

 Allgemeintoleranzen 470

 Maßtoleranzen 470

 ISO-Toleranzen 471

 Passungsarten 473

 Passungssysteme 475

Geometrische Produktspezifikation ISO-GPS 477

DIN EN ISO 8015:2011 –
GPS-Konzepte, -Prinzipien, -Regeln 477

Unabhängigkeitsprinzip 478

Hüllprinzip 479

Dimensionelle Tolerierung 480

 Örtliches oder lokales Maß 480

 Globales Maß 481

 Statistische Maße 481

 Geometrische Tolerierung 482

 Bezüge und Bezugssysteme 483

Begriffe für Form- und Lagetoleranzen 484

 Spezifikation durch eine Lehre 484

S STEUERUNGS- UND REGELUNGSTECHNIK

S1 AUTOMATISIERUNG DURCH STEUERN UND REGELN 485

Automatisierung der Fertigung 485

Steuern 485

Regeln 486

Steuerungsarten 487

Entwurf einer Steuerung 489

 Logische Grundsaltungen 489

 Darstellung der Steuerung 492

Technische Ausführung einer Steuerung 496

 Aufbau pneumatischer Steuerungen 496

 Beispiel: Biegevorrichtung 497

 Bauteile pneumatischer Steuerungen 501

 Elektrische Steuerungen 508

 Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) 512

 Projekt Bohrvorrichtung 515

 Projekt Schutztür 516

 Energieeffizienz in der Pneumatik 517

Hydraulik 518

 Physikalische Grundlagen 518

 Aufbau hydraulischer Steuerungen 520

S2 REGELUNGSTECHNIK AN WERKZEUGMASCHINEN 521

Grundbegriffe 521

Regler und Regelkreise 522

 Schaltende Regler 522

Lageregelung (Positionierantriebe) 523

 Kaskadenregelung 523

 Geschwindigkeitsvorsteuerung 524

S3 FLEXIBLE FERTIGUNGSANLAGEN 525

Organisation der Fertigung 525

 Einmaschinensystem 527

 Mehrmaschinensystem 529

Handhabungssysteme für flexible Fertigungsanlagen .. 531

 Werkzeug-Handhabungssysteme 531

 Werkstück-Handhabungssysteme 532

Transport und Materialfluss 536

 Flurbundene Fördermittel 536

 Flurfreie Fördermittel 537

 Aufgeständerte Fördermittel 538

Industrie 4.0 539

 Cyber Physical Systems (CPS) 540

 Embedded Systems 540

S4 AUFBAU VON CNC-WERKZEUGMASCHINEN 542

Merkmale von CNC-Werkzeugmaschinen 542

Antriebssysteme 543

Messsysteme 546

 Inkrementale Weg- und Winkelmessung 547

 Absolute Weg- und Winkelmessung 548

 Direkte und indirekte Weg- und Winkelmessung 550

S5 NUMERISCHE STEUERUNGEN 553

Konsequenzen des Einsatzes von CNC-
Werkzeugmaschinen 553

 Steuerung 554

 Steuerungsarten 557

Programmierung 558

 Grundlagen 559

 Schreiben des CNC-Programms 560

 Drehbearbeitung in der G17-Ebene 573

Übersicht über andere Programmierverfahren 575

 Dialog- und Werkstattprogrammierung 575

 CAD-CAM Bearbeitung 576

Einrichten der Maschine 577

Testen und Abarbeiten des Programms 579

Kommunikation in der Fertigung 580

Beispiel für ein CNC-Drehprogramm 581

SACHWORTVERZEICHNIS 586

BILDQUELLENVERZEICHNIS 607

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):

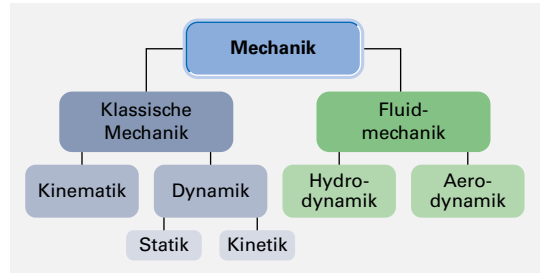
- Mechanik starrer Körper (Massepunkte und unverformbare Körper) **(Bild 2)**.

Festigkeitslehre:

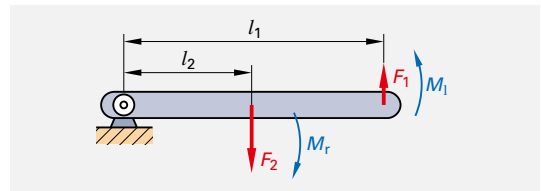
- Mechanik elastischer Körper. Die Elastizitätstheorie beschreibt elastische Verformungen. Das sind Verformungen, die sich nach Aufheben der verursachenden Kräfte wieder ohne bleibende Verformung zurückbilden (z. B. Feder) **(Bild 3)**.
- Mechanik plastischer Körper. Die Plastizitätstheorie beschreibt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

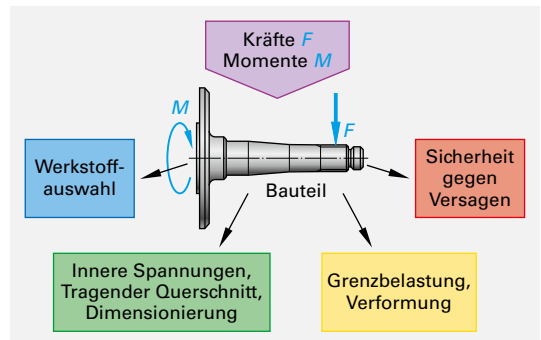
- Mechanik idealisierter, reibungsfreier Flüssigkeiten.
- Mechanik ruhender (statisch) Flüssigkeiten und Gase, Hydrostatik für Flüssigkeiten und Aerostatik für Gase.
- Mechanik bewegter (dynamisch) Flüssigkeiten und Gase, Hydrodynamik von Flüssigkeiten und Aerodynamik für Gase.
- Mechanik bewegter, realer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



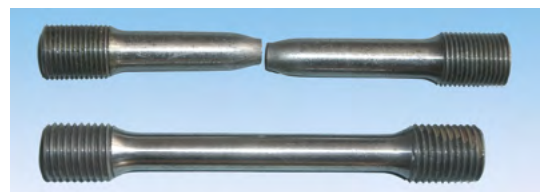
1 Teilgebiete der Mechanik



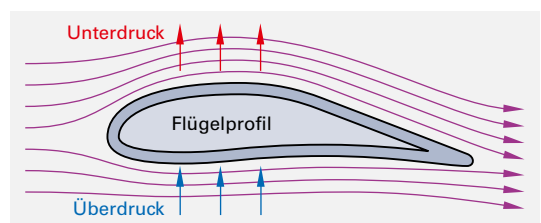
2 Mechanik starrer Körper, Statik



3 Kernaufgaben der Festigkeitslehre



4 Zugversuch, Zugproben



5 Strömungsmechanik

G2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Masse, Dichte und Volumen

Die Masse m eines Körpers und sein Volumen V sind proportional zueinander ($m \sim V$). D. h., verdoppelt sich das Volumen des Körpers, verdoppelt sich auch seine Masse. Die Dichte bleibt dabei gleich, da sich das Material nicht verändert (**Bild 1**).

Die Dichte ρ (Rho) ist der Quotient aus Masse m und Volumen V : $\rho = m / V$

Die Einheit der Dichte $[\rho]$ ist kg/m^3 oder g/cm^3 (**Bild 2**).

Die Dichte von Aluminium ist $\rho = 2,71 \text{ g/cm}^3$. Deshalb hat 1 cm^3 dieses Werkstoffs die Masse $m = 2,71 \text{ g}$. Die Dichte ist für jedes Material anders, sie ist deshalb eine Materialkonstante (**Bild 3**).

Da die Masse m und das Volumen V ortsunabhängig sind, ist auch die Dichte ρ ortsunabhängig. Das heißt, die Dichte und die Masse eines bestimmten Materials bzw. Körpers sind an allen Orten, z. B. auf der Erde, auf dem Mond und im Universum überall gleich.

Kraft und Kraftarten

Kraftwirkungen

Kräfte lassen sich durch ihre Wirkungen an einem Körper beschreiben (**Bild 4**).

Kräfte können:

- einen Körper beschleunigen,
- die Geschwindigkeit erhöhen,
- die Geschwindigkeit verringern,
- die Geschwindigkeitsrichtung ändern,
- Körper verformen.

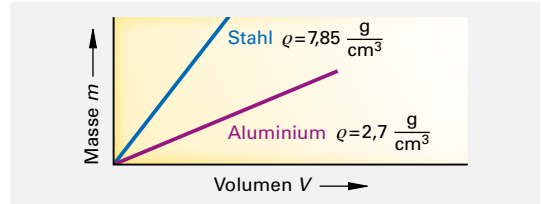
Eine beschleunigende als auch eine verformende Kraft wird durch drei Merkmale beschrieben:

- der Kraftgröße (Betrag, Stärke),
- der Kraftrichtung und
- dem Kraftangriffspunkt.

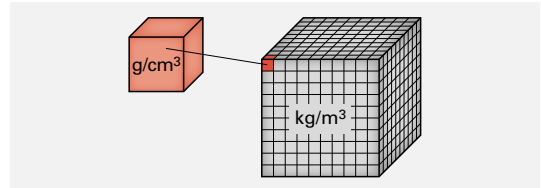
Aus diesem Grund können wir Kräfte durch Pfeile (**Vektoren**) mit einem Kräftemaßstab zeichnerisch darstellen (**Bild 5**):

- Die Länge des Pfeils beschreibt den Betrag der Kraft.
- Die Richtung des Pfeils beschreibt die Richtung der Kraft.
- Der Startpunkt des Pfeils beschreibt den Angriffspunkt der Kraft.

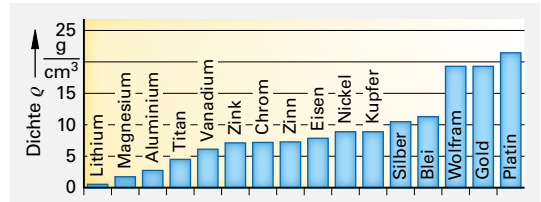
Die Gerade, die durch den Kraftpfeil festgelegt ist, wird als **Wirkungslinie** bezeichnet.



1 Masse und Volumen



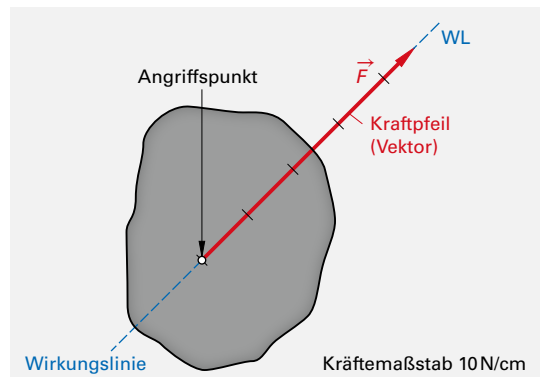
2 Dichte



3 Dichte verschiedener Metalle



4 Kaltverformung durch Kräfteinwirkung



5 Kraftvektor

Überstrom-Schutzeinrichtungen

Um Geräte und Leistungen vor Überlastung durch zu hohe Ströme zu schützen, werden sie durch Überstrom-Schutzeinrichtungen, kurz Sicherungen, geschützt. Sicherungen sind Bauteile, die beim Überschreiten des zulässigen Höchststromes den Stromkreis unterbrechen.

Sicherungen schützen Leitungen und Geräte vor Überlastung und Kurzschluss.

Man unterscheidet Schmelzsicherungen, Sicherungsautomaten und Motorschutzschalter.

Schmelzsicherungen

Schmelzsicherungen enthalten im Inneren einen dünnen draht- oder bandförmigen Schmelzleiter (**Bild 1**). Sie sind in die zuführende Stromleitung eines Verbrauchers eingebaut. Bei zu hoher Stromstärke schmilzt der Schmelzleiter und unterbricht den Stromkreis.

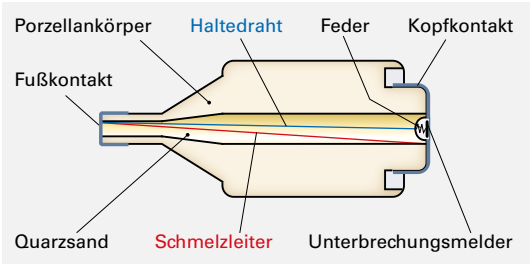
Schmelzsicherungen gibt es für Absicherungsströme von 10 A bis 50 A. Sie haben unterschiedliche Kennfarben und die Fußkontakte haben verschiedene Durchmesser (**Bild 1**). Dadurch können Schmelzsicherungen für höhere Ströme nicht in Einsätze für niedrigere Ströme eingeschraubt werden. Kleine Schmelzsicherungen, die in Elektrogeräte eingebaut sind, nennt man **Geräteschutzsicherungen** oder Feinsicherungen. Sie dienen zum Absichern von Geräten der Messtechnik und der Elektronik. Nach dem Auslöseverhalten unterscheidet man superflinke (FF), flinke (F), mittelträge (M), träge (T) und superträge (TT) Feinsicherungen.

Sicherungen dürfen nicht geflickt oder überbrückt werden.

Beim Auswechseln einer Sicherung ist unbedingt eine Sicherung mit dem vom Hersteller angegebenen Absicherungsstrom zu verwenden.

- **Leitungsschutzschalter**, auch Sicherungsautomaten genannt, haben einen Sofort- und einen Langzeit-Abschaltmechanismus (**Bild 2**). Ein Bimetallschalter wird bei fortlaufender Überlastung des Stromnetzes wirksam und ein magnetischer Schalter unterbricht bei Kurzschluss den Stromkreis sofort.
- **Motorschutzschalter** sind Schalter zum Ein- und Ausschalten von Motoren (**Bild 3**). Auch sie haben zwei Abschaltmechanismen: einen thermischen Auslöser zum Schutz der Motorwicklung bei langer hoher Belastung und eine elektromagnetische Auslösung bei kurzen, hohen Stromstärken (Überlastschutz).

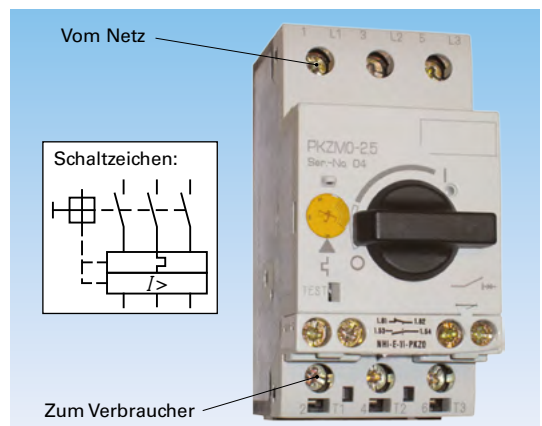
Motorschutzschalter, die den Motor vor Überlast und Kurzschluss schützen, müssen am Anfang der Motorzuleitung eingebaut sein.



1 Schmelzeinsatz einer Schraubsicherung



2 Sicherungskasten



3 Motorschutzschalter eines Drehstrommotors

Fehler an elektrischen Anlagen

Unfälle durch elektrischen Strom entstehen durch technische Mängel an Geräten und Anlagen, vor allem aber durch Unachtsamkeit.

Wirkungen des elektrischen Stromes im menschlichen Körper

Fließt elektrischer Strom durch den Menschen, z. B. beim Berühren eines unter Spannung stehenden Leiters, wird ab einer bestimmten Stromstärke die Atemmuskulatur gelähmt. Die Folgen sind Nichtloslassen-Können, Verkrampfungen, Gleichgewichtsstörungen, Herzkammerflimmern und Atemstillstand.

Ströme mit Stromstärken über 50 mA und Wechselspannungen über 50 V sind lebensgefährlich.

Bei Arbeiten an elektrischen Anlagen oder nach einem Unfall durch Elektrizität sind folgende **fünf lebenswichtige Sicherheitsregeln** zu beachten, deren Reihenfolge unbedingt eingehalten werden muss (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Sicherheitsregeln bei Anlagen oder Maschinen, die unter Spannung stehen

1. Freischalten	Abschalten aller nicht geerdeten Leitungen, Sicherungsautomaten abschalten, Verbotsschilder anbringen.
2. Gegen Wiedereinschalten sichern	Herausnehmen und Verwahren der Sicherungen, Abschließen (Vorhängeschloss) von Schaltern, Sicherungseinsätze mitnehmen.
3. Spannungsfreiheit feststellen	Durch Elektrofachkraft mit geeigneten Messgeräten oder Spannungsprüfern.
4. Erden	Teile, an denen gearbeitet wird, müssen geerdet werden.
5. Benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken	Es ist zu vermeiden, dass arbeitende Personen mit Werkzeugen und Hilfsmitteln an leitende oder Spannung führende Teile geraten, daher Körperschutz, z. B. Schutzhelm und Handschuhe, tragen.

Fehler an elektrischen Anlagen

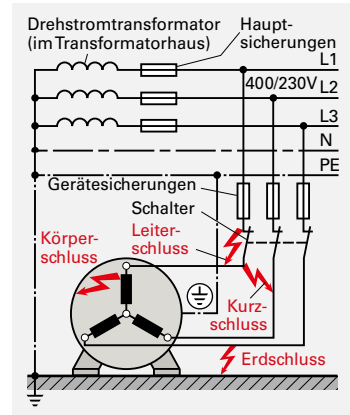
Durch Fehler an der Isolation können an elektrischen Anlagen Kurzschluss, Erdschluss, Leiterschluss und Körperschluss auftreten (**Bild 1**).

Kurzschluss entsteht zwischen zwei unter Spannung stehenden elektrischen Leitern, wenn sie sich ohne Isolation berühren. Die vorgeschaltete Sicherung schaltet den dabei entstehenden großen Kurzschlussstrom ab.

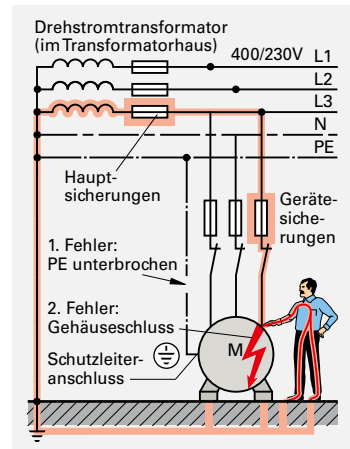
Erdschluss entsteht durch eine direkte Verbindung eines Spannung führenden Leiters mit der Erde bzw. geerdeten Teilen. Auch hier schaltet die Sicherung den Erdschlussstrom ab.

Leiterschluss entsteht z. B. durch die schadhafte Überbrückung eines Schalters, wodurch die Anlage nicht abgeschaltet werden kann.

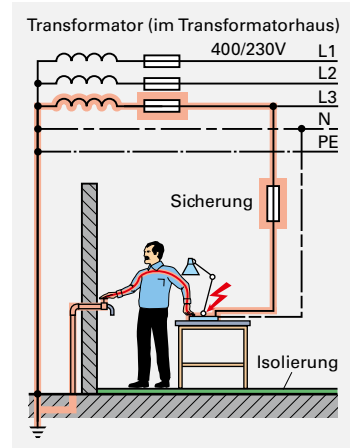
Beim **Berühren eines Gerätes mit Körperschluss** fließt Strom durch den Menschen zur Erde (**Bild 2**). Die Größe dieses Fehlerstroms hängt vom Widerstand des menschlichen Körpers und vom Leitvermögen der Erdverbindung ab. Steht der Berührende mit einer gut geerdeten Leitung in Verbindung (Wasser-, Gas- oder Heizleitung), kann durch ihn ein gefährlich starker Strom fließen (**Bild 3**).



1 Kurzschluss, Erdschluss, Leiterschluss, Körperschluss



2 Berührungsspannung



3 Fehlerstromkreis

Stahlnormung

Für Stähle gibt es zwei unterschiedliche Bezeichnungssysteme:

- mit Kurznamen – DIN EN 10027-1
- mit Nummernsystem – DIN EN 10027-2

Bezeichnung mit Kurznamen DIN EN 10027-1

Innerhalb des Bezeichnungssystems mit Kurznamen wird wiederum in zwei Hauptgruppen unterschieden. In der Hauptgruppe 1 können aus der Bezeichnung der Stähle mechanische oder physikalische Eigenschaften herausgelesen werden. Die Kurznamen für Stähle in der Hauptgruppe 2 geben Aufschluss über die chemische Zusammensetzung.

Hauptgruppe 1

Die Bezeichnung entsprechend der mechanischen oder den physikalischen Eigenschaften des Stahls.

Der erste Buchstabe gibt im Kurznamen des Stahls den Verwendungszweck an, die angehängte Zahl gibt die Mindeststreckgrenze R_e in N/mm^2 an. Am Ende des Kurznamens kann ein Zusatzsymbol stehen, das auf weitere Eigenschaften hinweist (**Bild 1**).

Hauptgruppe 2

Die Bezeichnung entsprechend der chemischen Zusammensetzung des Stahls. Es gibt unterschiedliche Angaben für unlegierte, legierte und hochlegierte Stähle sowie für Schnellarbeitsstähle.

Unlegierte Stähle werden mit dem Buchstaben C für Kohlenstoff gekennzeichnet, gefolgt vom Kohlenstoffgehalt mit 100 multipliziert (**Bild 2**).

Bei **legierten** Stählen wird an erster Stelle der Kohlenstoffgehalt multipliziert mit dem Faktor 100 angegeben (ohne den Buchstaben C wie bei unlegierten Stählen). Danach folgen die chemischen Kurzzeichen für die Legierungselemente, dann die Massegehalte der Legierungselemente, die multipliziert mit unterschiedlichen Faktoren angegeben werden (**Bild 3**).

Multiplikatoren für Legierungselemente:

Faktor 4: Cr, Co, Mn, Ni, Si, W

Faktor 10: Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb

Faktor 100: Ce, N, P, S, C

Bei **hochlegierten Stählen** liegt der Masseanteil der Legierungselemente bei mindestens 5%. Sie werden mit einem X im Kurznamen gekennzeichnet. Das X steht an erster Stelle, gefolgt vom Kohlenstoffgehalt multipliziert mit dem Faktor 100, dann die anderen Legierungselemente mit ihrem chemischen Kurzzeichen. Als letztes folgen die Masseanteile der Legierungselemente, die bei hochlegierten Stählen mit dem Faktor 1 multipliziert werden. Die Legierungselemente werden in der Reihenfolge ihrer Massenanteile angegeben, beginnend mit dem höchsten Wert (**Bild 4**).

S235JR

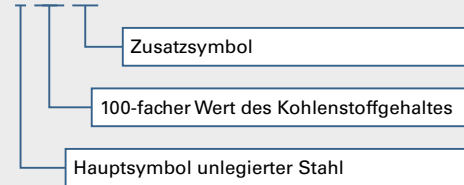
- Einsatzgebiet S: Stahl für Stahlbau
- Mindeststreckgrenze R_e : 235 N/mm^2
- Kerbschlagzähigkeit: 27 J (bei 20°C)

E360+C

- Einsatzgebiet E: Maschinenbau
- Mindeststreckgrenze R_e : 360 N/mm^2
- Zusatzsymbol +C gut kaltumformbar

1 Beispiele für Hauptgruppe 1

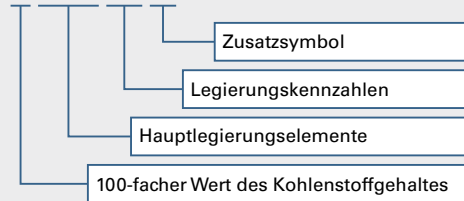
C 60E +N



- Unlegierter Stahl mit 0,60 Massen% C-Gehalt
- E vorgeschriebener maximaler Schwefelgehalt
- normalgeglüht +N

2 Beispiel für unlegierten Stahl

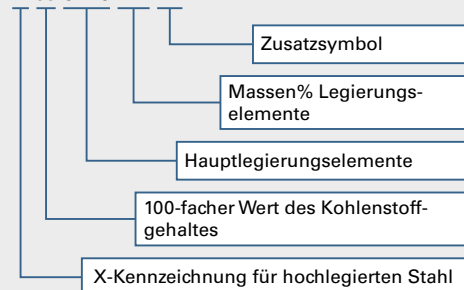
33 CrMoV 12-9 +N



- Nitrierstahl mit 0,33 Massen% C-Gehalt
- Chromgehalt 3%, Molybdängehalt 0,9%, Vanadium unter Grenzgehalt von 0,10%
- normalgeglüht +N

3 Beispiel für legierten Stahl

X 39 CrMo 17-1 +A



- Martensitischer Stahl mit 0,39 Massen% C-Gehalt
- Chromgehalt 17%, Molybdängehalt 1,0%
- weichgeglüht +A

4 Beispiel für hochlegierten Stahl

Normung der Schnellarbeitsstähle

Schnellarbeitsstähle sind Werkzeugstähle mit besonderen Eigenschaften und Legierungszusammensetzungen. Sie werden in einem eigenen Bezeichnungssystem klassifiziert. Bei ihnen steht an erster Stelle die Kennzeichnung HS, gefolgt von den Masseanteilen der Legierungsbestandteile in der festen Reihenfolge W, Mo, V, Co. Die Masseanteile der Legierungsbestandteile werden hier in ganzen gerundeten Zahlen angegeben (**Tabelle 1**).

Bezeichnung mit Nummernsystem DIN EN 10027-2

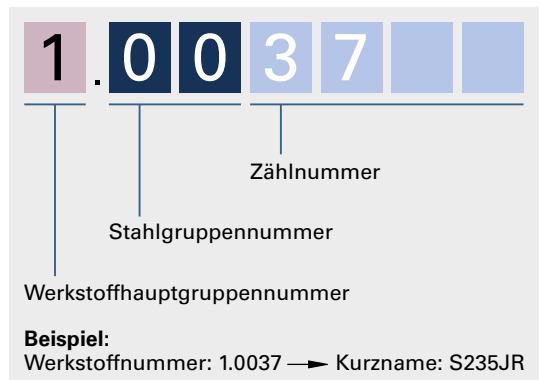
Das zweite Bezeichnungssystem für Stähle ist das Nummernsystem. Darin kann jeder Stahl durch eine Nummerncodierung bestimmt werden kann.

Die Nummer besteht aus drei Teilen:

1. Der Werkstoffhauptgruppennummer, die für Stahl 1 ist (**Bild 1**),
2. der zweistelligen Stahlgruppennummer (**Tabelle 2**). Sie gibt an, um welche Stahlart es sich handelt (unlegiert, legiert, Grundstahl, Qualitätsstahl, Edelstahl) und
3. einer vierstelligen Zählnummer, wobei die letzten beiden Stellen (Anhängeziffern) bisher nicht genutzt werden.

Tabelle 1: Bezeichnung der Schnellarbeitsstähle

Kurzname nach DIN	Werkstoff-Nr.	Chemische Zusammensetzung in %				
		Cr<	W<	Mo<	V<	Co<
HS 12-1-4-5	1.3202	4,3	12	0,8	3,8	4,8
HS 10-4-3-10	1.3207	4,5	9,5	3,5	3,2	10
HS 12-1-2-3	1.3211	4,2	12,5	1	2,5	3
HS 18-1-2-3	1.3245	4,2	18,5	1	1,5	3
HS 2-9-2-8	1.3249	4	2	9	2,2	8,5
HS 18-1-2-5	1.3255	4,5	18,5	0,8	1,7	5
HS 18-1-2-15	1.3257	4,5	18,5	1,5	2	15



1 Nummernsystem nach DIN EN 10027-2

Tabelle 2: Stahlgruppennummern

Unlegierte Stähle	Legierte Stähle
Qualitätsstähle	Qualitätsstähle
00, 90 Grundstähle	08, 98 Legierte Stähle mit speziellen physikalischen Eigenschaften
01, 91 Allgemeine Baustähle	09, 99 Stähle für unterschiedliche Einsatzgebiete
02, 92 Sonstige Baustähle, $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$	Edelstähle
03, 93 $C < 0,12\%$, $R_m < 400 \text{ N/mm}^2$	20...28 Werkzeugstähle
04, 94 $0,12\% \geq C < 0,25\%$ oder $400 \text{ N/mm}^2 \leq R_m < 500 \text{ N/mm}^2$	32 Schnellarbeitsstähle mit Co
05, 95 $0,25\% \leq C < 0,55\%$ oder $500 \text{ N/mm}^2 \leq R_m < 700 \text{ N/mm}^2$	33 Schnellarbeitsstähle ohne Co
06, 96 $C \geq 0,55\%$, $R_m \geq 700 \text{ N/mm}^2$	35 Walzlagerstähle
07, 97 Stähle mit höherem P- oder S-Gehalt	36, 37 Stähle mit speziellen magnetischen Eigenschaften
Edelstähle	38, 39 Stähle mit speziellen physikalischen Eigenschaften
10 Stähle mit speziellen physikalischen Eigenschaften	40...45 Nichtrostende Stähle
11 Bau-, Maschinen- und Behälterstähle mit C-Gehalt $< 0,5\%$	46 Chemisch beständige und hochwarmfeste Ni-Legierungen
12 Maschinenbaustähle mit C-Gehalt $\geq 0,5\%$	47, 48 Hitzebeständige Stähle
13 Bau-, Maschinen- und Behälterstähle mit speziellen Anforderungen	49 Hochwarmfeste Werkstoffe
15...18 Werkzeugstähle	50...84 Bau-, Maschinen- und Behälterstähle nach Legierungselementen geordnet
	85 Nitrierstähle
	87...89 Hochfeste schweißgeeignete Stähle, nicht für Wärmebehandlung bestimmte Stähle

Bearbeitung harter Eisenwerkstoffe

Die Bearbeitung von Stahlwerkstoffen und von Gusseisenwerkstoffen mit Härten von 50 HRC bis 62 HRC ist nicht mehr ausschließlich dem Schleifen vorbehalten. Verbesserte Kenntnisse über den Zerspanungsvorgang und die Entwicklung hochharter, verschleißbeständiger und temperaturbeständiger Schneidstoffe wie z.B. Hartmetall Schneidkeramik und Bornitrid ermöglichen eine spanende Bearbeitung mit definierter Schneidengeometrie.

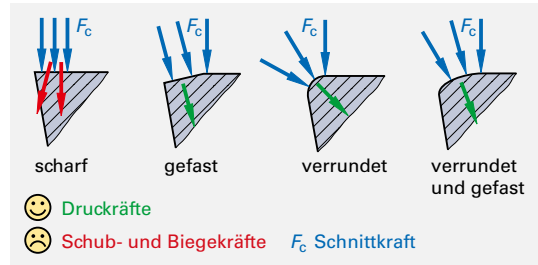
Besondere Anforderungen an Schneidstoffe in der Hartbearbeitung:

- Abrasionsbeständigkeit, Diffusionsbeständigkeit und Oxidationsbeständigkeit,
- Hohe Schneidkantenstabilität,
- Wärmebeständigkeit und Warmhärte,
- Druckfestigkeit und Biegefestigkeit.

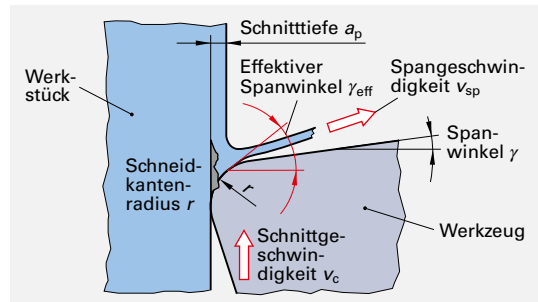
Stahlwerkstoffe mit hoher Härte beinhalten entweder einen großen Martensitanteil im Gefüge oder eine entsprechende Menge an metallischen Kohlenstoffverbindungen (Karbide). Das bei Raumtemperatur fehlende plastische Verformungsvermögen führt gegenüber duktilen Stählen bei der Bearbeitung zu einem veränderten Zerspanungsvorgang. Wegen der großen Zerspanungskräfte und den hohen Temperaturen in der Kontaktzone der Schneidkante und dem Werkstoff müssen der Schneidkeil und die Schneidkante stabil ausgeführt werden.

Damit im Bereich der Schneidkante nur Druckkräfte und keine ungünstigen Schub- und Biegekräfte auftreten, wird die Schneidkante mit einer Verrundung und/oder einer Schneidkantenfase ausgeführt (**Bild 1**). Bei kleinen Spanungsdicken in der Größenordnung der Schneidkantenverrundung entsteht ein effektiv negativ wirksamer Spanwinkel (**Bild 2**).

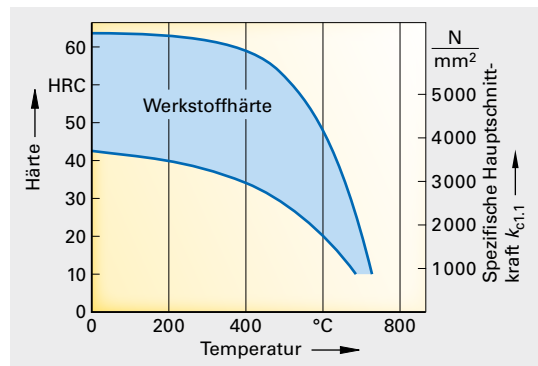
Die auftretenden spezifischen Hauptschnittkräfte sind im Vergleich zur Weichbearbeitung etwa 2,5-fach höher. Das gleichzeitige Auftreten hoher spezifischer Schnittkräfte und durch Reibungs-, Abscherungs- und Umformungsvorgänge verursachen hohen Zerspanungstemperaturen an der Spanwurzel führen zu einer geringen plastischen Verformbarkeit des Spans und ermöglichen sogar längere Spanformen. Steigert man die Schnittgeschwindigkeit in einem Bereich, bei dem der Span zu glühen beginnt, vermindert sich die mechanische Festigkeit und die spezifische Schnittkraft des Werkstoffs in der Scherzone und im ablaufenden Span (**Bild 3 und Bild 4**).



1 Schneidkantenausführungen



2 Effektiv wirksamer Spanwinkel bei kleiner a_p



3 Härte und spezifische Schnittkraft bei gehärtetem Stahl



4 Hartbearbeitung

Aluminium-Legierungen

Da Reinaluminium aufgrund seiner Weichheit und hohen Verformungsfähigkeit für technische Anwendungen kaum eingesetzt wird, kommen für hochwertige Bauteile nur Aluminium-Legierungen in Betracht. Grundsätzlich lassen sich Alu-Legierungen in Knetlegierungen und Gusslegierungen einteilen.

Alu-Knetlegierungen sind wegen der vollständigen Lösung der Legierungselemente und der homogenen Mischkristallverteilung in der Aluminiumgrundmatrix gut warm- und kaltumformbar. Bei der spanenden Bearbeitung ist i. A. kein prozessbestimmender Schneidkantenverschleiß festzustellen. Die homogene Verteilung der wenig abrasiv wirkenden Mischkristalle im Gefüge (AlCuMg, Mg₂Al₃) erzeugt bei HM-Werkzeugen einen geringen Freiflächenverschleiß. Die Weichheit dieser Legierungen macht aber eine Zerspanung wegen der Schmierwirkung, Scheinspannbildung und Aufbauschneidenbildung schwierig.

Alu-Gusslegierungen die mit gießtechnischen Verfahren verarbeitet werden, besitzen gute Gießeigenschaften und im Vergleich mit den Alu-Schmiedelegerungen gute Zerspanbarkeit. Hierbei handelt es sich legierungstechnisch um Zwei- oder Mehrstoffsysteme mit eutektischer Zusammensetzung. Eutektische Legierungen sind gut vergießbar, da sie einen niederen Schmelzpunkt haben, bei der eutektischen Temperatur ohne Haltezeit erstarren und eine geringe Schwindung besitzen. Bei entsprechender Prozessführung entsteht ein feinkörniges Gefüge mit guten Festigkeitseigenschaften. Bei dem Zweistoffsystem Aluminium-Silizium stellt sich eine eutektische Zusammensetzung bei ca. 12% Silizium ein (**Bild 1**).

Die Art und Menge der zulegierten Elemente beeinflussen den Gefügebau und die Eigenschaftswerte der Alu-Legierung. Hauptlegierungselemente sind Silizium (Si), Zink (Zn), Zinn (Sn), Blei (Pb), Mangan (Mn), Magnesium (Mg), Eisen (Fe) und Kupfer (Cu) (**Tabelle 1**).

Bei den **nichtaushärtbaren Legierungen** werden die Festigkeitseigenschaften durch die Mischkristallbildung der Legierungselemente und durch eine entsprechende Kaltverfestigung beim Herstellprozess der Halbzeuge (z.B. Strangpressprofile, Bleche) bestimmt.

Bei **kalt- oder warm-aushärtbaren** Legierungen wird die Festigkeitssteigerung durch die Bildung von intermetallischen Phasen wie z.B. Mg₂Si, Al₅Cu₂Mg oder Al₂Mg₃Zn₃ erreicht (**Bild 2**).

Die **Zerspanbarkeit der Aluminiumlegierungen** ist abhängig von der Zusammensetzung und vom Gefügestand. Der Werkzeugverschleiß ist bei Aluminium geringer als bei Stahl, da weitaus niedrigere Schnitttemperaturen und Zerspankräfte auftreten. Die hauptsächlichen Verschleißursachen sind Adhäsionsvorgänge bei der Aufbauschneidenbildung

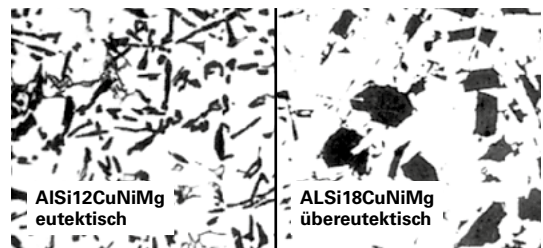
sowie, vor allem bei übereutektischen Al-Si-Legierungen, mechanischer Abtrag. Im Allgemeinen tritt kein Kolkverschleiß auf, sodass als Kriterium für das Standzeitende die Verschleißmarkenbreite verwendet wird.

Siliziumhaltige Gusswerkstoffe bilden die weitestwichtige Gruppe der Gusslegierungen. Übereutektische Al-Si-Gusslegierungen weisen in ihrem Gefüge Siliziumausscheidungen mit bis zu 0,1 mm Durchmesser auf. Diese Siliziumkörner haben eine etwa 10fache Härte gegenüber dem Grundgefüge. Hierin begründet sich die außerordentlich abrasive Wirkung bei der Zerspanung. Bei stark verschleißfördernden Legierungen werden hauptsächlich Werkzeuge mit PKD- sowie beschichtete Hartmetallschneiden eingesetzt.

Schneidkeramik und TiN-beschichtetes Hartmetall sind für die Aluminiumzerspanung ungeeignet, da zwischen Al₂O₃ bzw. Titan und dem Aluminium chemische Reaktionen auftreten.



1 Bauteile aus Aluminium-Legierungen



2 Gefügebilder für Aluminium-Legierungen

Tabelle 1: Einflüsse der Legierungsbestandteile

	Si	Zn	Pb	Mn	Mg	Fe	Cu
Festigkeit					↑	↑	↑
Bearbeitbarkeit			↑				↑
Verformbarkeit				↑			
Gießbarkeit	↑	↑		↑			
Korrosionsbeständigkeit	↑				↑		

Schleifmittelbindung

Die Bindung hat die Aufgabe, das Schleifkorn in der Schleifscheibe so lange festzuhalten, bis es abgenutzt ist. Danach soll das Schleifkorn durch die angestiegenen Schnittkräfte entweder brechen und damit neu scharfe Schneidkanten freigeben oder als Ganzes aus der Bindung ausbrechen und neuen Körnern Platz machen.

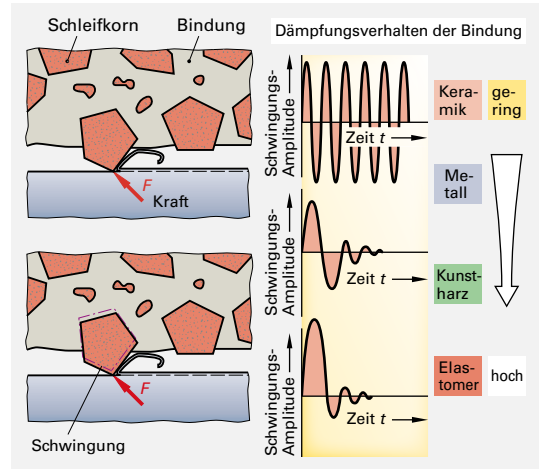
Die Scheibenleistung und die Wirtschaftlichkeit der Schleifoperation werden neben der Schleifstoffqualität, der Korngröße und der Arbeitsgeschwindigkeit (**Tabelle 1**) vor allem durch eine optimal gewählte Bindung bestimmt. Neben der Kornungsgröße und der Konzentration beeinflusst die Bindung auch selbst die Schleifleistung. Im Allgemeinen haben die Scheiben mit harter Bindung eine längere Lebensdauer. Der Scheibenquervorschub und die Lebensdauer der Scheibe stehen in einem umgekehrten Verhältnis zueinander. Je höher der Scheibenquervorschub wird, desto kürzer wird die Lebensdauer der Scheibe.

Die verschiedenen Bindungen unterscheiden sich durch die allgemeinen Eigenschaften (**Tabelle 2**):

- Formbeständigkeit,
- Zähigkeit,
- Wärmeleitfähigkeit,
- Dämpfung (**Bild 1**),
- Temperaturbeständigkeit,
- Profilierbarkeit bzw. Abrichtbarkeit.

Die wesentlichen Anforderungen an die Schleifmittelbindung sind:

- Festhalten der scharfen Schleifkörner beim Schleifprozess,
- Festhalten der abgestumpften Körner beim Nachschärfprozess,
- Kornbruch durch Schleifkräfte, Selbstschärfung
- Kornbruch durch Werkzeuge, Abrichtprozess
- Freigabe der abgestumpften Restkörner,
- geringer Verschleiß der Abrichtwerkzeuges,
- angepasste mechanische Eigenschaften, Festigkeit, E-Modul, Dämpfung, Zähigkeit,
- thermische Beständigkeit,
- ausreichende Wärmeleitfähigkeit und geringe Wärmeübergangswiderstände zur Ableitung der Wärme aus dem Schleifkorn,
- Absorbieren der Stoßbeanspruchung,
- Abriebbeständigkeit gegen Späne und Schleifscheibenantrieb,
- Grenzschichtbildung durch chemische Reaktion mit dem Schleifkorn,
- keine chemischen und physikalischen Reaktionen mit dem Werkstückwerkstoff bzw. den Spänen,
- Beständigkeit gegen Kühlschmiermittel,
- gute Verarbeitbarkeit bei der Scheibenherstellung.



1 Dämpfungsverhalten der Bindung

Tabelle 1: Arbeitsgeschwindigkeiten für Diamantscheiben und für CBN-Scheiben

Art des Schleifens	Kunstharzbindungen		Metallbindungen	
	Nassschliff	Trockenschliff	Nassschliff	Trockenschliff
Diamant-Schleifscheiben				
Oberflächenschleifen	20 bis 30 m/s		15 bis 20 m/s	
Innenzylindrisches Schleifen	16 bis 25 m/s	15 bis 20 m/s	15 bis 20 m/s	10 bis 15 m/s
Außenzylindrisches Schleifen	20 bis 30 m/s		15 bis 25 m/s	
Werkzeugschleifen	18 bis 28 m/s	15 bis 20 m/s	15 bis 20 m/s	10 bis 15 m/s
CBN-Schleifscheiben				
Oberflächenschleifen	22 bis 35 m/s		20 bis 25 m/s	
Innenzylindrisches Schleifen	20 bis 30 m/s	18 bis 25 m/s	15 bis 25 m/s	15 bis 20 m/s
Außenzylindrisches Schleifen	22 bis 35 m/s		20 bis 25 m/s	
Werkzeugschleifen	20 bis 30 m/s	18 bis 25 m/s	15 bis 20 m/s	5 bis 25 m/s

Tabelle 2: Bindungseigenschaften

	Dämpfung	Formbeständigkeit	Temperaturbeständigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Abrichtbarkeit
Kunstharz	gut	gut	gut	gut	sehr gut
Metall	gering	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
Keramik	gering	gut	sehr gut	gering	sehr gut
Elastomer	sehr gut	gering	gering	gering	gut

Bindungen

Die Hauptgruppen mit Kennbuchstaben sind:

- V keramische Bindungen,
- B Kunstharzbindungen,
- M Metallbindungen,
- R Elastomerbindung.

Keramische Bindung (Kennbuchstabe V)

Die keramische Bindung setzt sich hauptsächlich aus Tonerde, Quarz und Feldspat zusammen. Durch das Brennen bei etwa 1000 °C bis 1400 °C umschließt die Bindung das Schleifkorn und bildet Bindungsbrücken von Schleifkorn zu Schleifkorn mit der gewünschten Porosität des Gefüges. Die Bindungskomponenten werden beim Brennvorgang in wärme- und chemisch beständiges, sprödes Glas bzw. Porzellan umgewandelt. Keramische Bindungen werden überwiegend zum Präzisionsschleifen von Stählen mit Korundscheiben oder Siliziumkarbidscheiben verwendet. Etwa 60 % der gesamten Schleifscheibenproduktion ist keramisch gebunden. Keramisch gebundene Schleifwerkzeuge zeichnen sich durch gute Kanten- und Formstabilität aus, sind temperaturbeständig und leicht abriebbar.

Kunstharzbindung (Kennbuchstabe B)

Hierbei handelt es sich um Reaktionsprodukte von Phenol und Formaldehyd. Es bilden sich bei etwa 160 °C bis 180 °C sehr feste und hochelastische Phenolharze und Phenolplaste. Diese Eigenschaften erlauben den Einsatz in Abgratscheiben oder Trennscheiben, auch mit Gewebeerstärkung bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten und das Profilschleifen harter Werkstoffe mit Bornitrid- und Diamantschleifscheiben.

Metallbindung (Kennbuchstabe M)

Diamantschleifwerkzeuge und Bornitridschleifwerkzeuge zum Profil- und Werkzeugschleifen werden häufig mit einer galvanisch oder gesinterten Metallbindung auf einen Tragkörper aus Stahl oder Aluminium aufgebracht. Die metallische Bindung besitzt eine ausgezeichnete Formbeständigkeit, Kornhaftung und Temperaturbeständigkeit, gute Zähigkeit und eine große Wärmeleitfähigkeit, während die Dämpfungseigenschaften und die Profilierbarkeit weniger stark ausgeprägt sind.

Elastomerbindung (Kennbuchstabe R)

Gummibindungen werden aus Naturgummi (Latex), der durch Vulkanisieren gehärtet wird, und aus synthetischem Gummi hergestellt. Elastomerbindungen besitzen eine hohe Dämpfung, Zähigkeit und gute Profilierungseigenschaften. Sie sind weniger formstabil und bei geringer Wärmeleitfähigkeit nicht öl- und temperaturbeständig. Elastomergebundene Schleifscheiben werden häufig in Verbindung mit feiner Körnung für höchste Oberflächengüten verwendet.

Härte und Gefüge

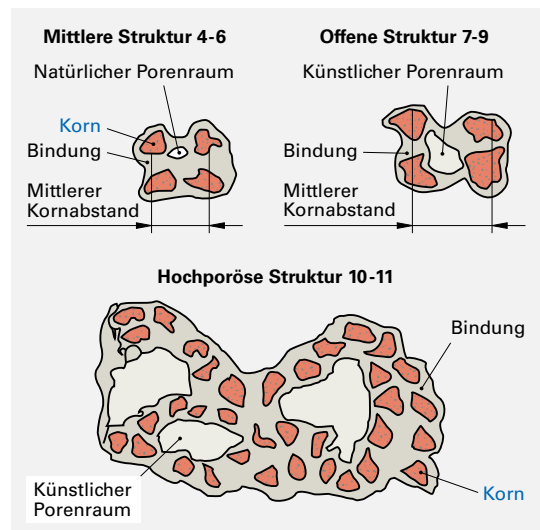
Der Härtebegriff ist in Bezug auf die Schleifscheibenhärte keine eindeutige Definition im physikalischen Sinne. Die Härte von Schleifscheiben wird ohne Angabe einer Dimension wie folgt definiert:

Unter Schleifscheibenhärte versteht man den Widerstand gegen das Herauslösen von Schleifmittelkörnern aus dem Schleifkörper, der von der Haftfähigkeit der Bindung am Korn und von der Festigkeit der Bindungsbrücken abhängig ist.

Der Aufbau für ein Schleifwerkzeug ist dann optimal, wenn das abgestumpfte Korn nach der ihm zukommenden Zerspanungsarbeit von der Bindung ganz oder teilweise freigegeben wird. Bei einem Schleifwerkzeug mit einem bestimmten Bindungstyp wird die Härte von der relativen Bindungsmenge bestimmt.

Der Härtegrad ist keine Angabe der Schleifmittelhärte, sondern der Gebrauchsfestigkeit des Schleifwerkzeugs. Der Härtegrad einer Schleifscheibe wird mit einem Buchstaben von A (sehr weich) bis Z (äußerst hart) gekennzeichnet. Harte Schleifwerkzeuge erfordern in Verbindung mit feiner Körnung eine hohe Systemsteifigkeit und eine größere Antriebsleistung der Maschine.

Das Gefüge des Schleifwerkzeugs ist durch die Abstände zwischen den Schleifkörnern bestimmt und wird nach dem Volumengehalt des Schleifmittels im Schleifkörper gemessen (**Bild 1**).



1 Gefügestruktur

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.

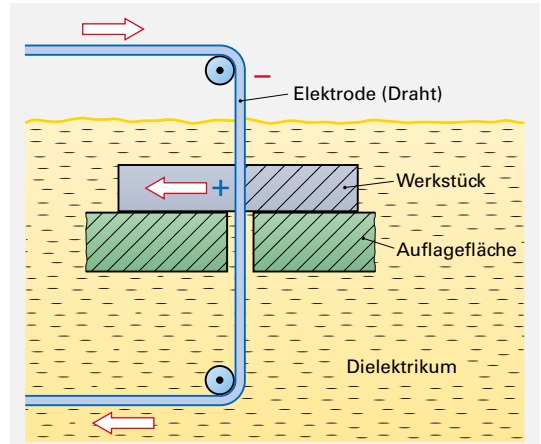
Dieser materialzerstörende Effekt wird beim funkenerosiven Abtragen sinnvoll genutzt. Mit diesem auch **Erodieren** genannten Fertigungsverfahren können alle elektrisch leitenden Werkstoffe geschnitten oder gesenkt werden. Es wird deshalb unterschieden in **funkenerosives Senken** und **funkenerosives Schneiden** (Bild 3b). 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.

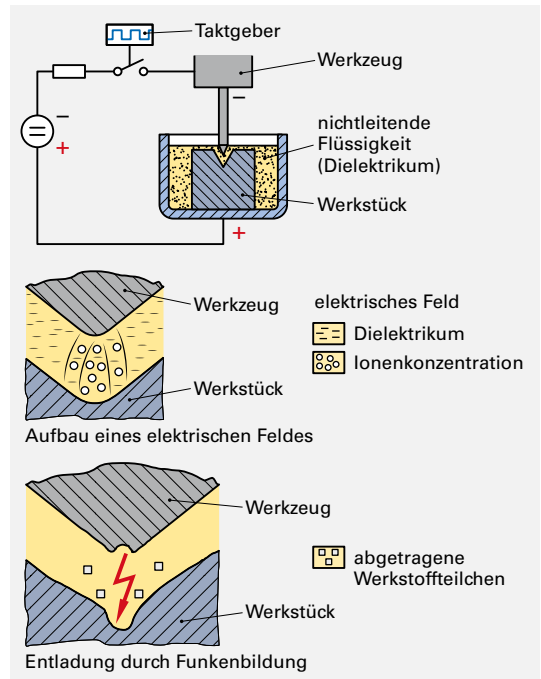
An Werkstück und Werkzeug wird je nach Maschinenausführung eine pulsierende Gleichspannung von 20 V bis 150 V angelegt. Die beiden Metalle werden so zu Elektroden. Zwischen den Elektroden befindet sich eine elektrisch nicht leitende Flüssigkeit (Dielektrikum). Diese Flüssigkeit bewirkt, dass sich ein 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 (Bild 3a). 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.

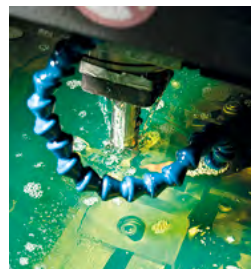
Die Nachteile des **Senkerodierens** liegen vor allem in den relativ hohen Werkzeugkosten. Da auch das Werkzeug zerstört wird, muss oft zum Schlichten ein zweites formideales Gegenstück gefertigt werden. Außerdem ist beim Schlichten die Abtragsleistung sehr gering. Wegen des großen Bearbeitungsaufwandes 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)



3a Senkerodieren



3b Messingdraht zum Drahterodieren

Erosives Abtragen durch Flüssigkeit

Das **Wasserstrahlschneiden** ist ein Kaltschneidverfahren, bei dem das Schneidwasser mit einem Druck von 2800 bar bis zu 6000 bar komprimiert und mittels einer Düse zu einem Strahl mit 0,1 bis 1 mm Durchmesser gebündelt wird. Der Schneidstrahl hat eine Strömungsgeschwindigkeit an der Düse von 300 m/s bis 700 m/s, das entspricht 1000 km/h bis 2500 km/h. Die Schneiddüse führt eine Relativbewegung zum ruhenden Werkstück aus und erzeugt mit dem ausströmenden Wasserstrahl den Schnitt. Zur Vernichtung der kinetischen Restenergie des Abrasivstrahls dient ein Strahlfänger (catcher), der unterhalb der Schneidebene angebracht ist (**Bild 1**).

Durch die Zugabe von Abrasivmitteln (z.B. Granatsand, Korund, Glasperlen) wird die Mikrozerspanung am Werkstoff erhöht. In diesem Fall dient der Wasserstrahl lediglich zur Beschleunigung der Feststoffpartikel (**Bild 2**).

Werkstoffe wie hochlegierte und verschleißfeste Stähle, Edelstahl, Aluminium, Titan, Keramik, (Panzer)glas, Granit, Marmor, CFK, GFK, Thermoplaste und Duroplaste, Faserverbundstoffe wie GFK und CFK, Hart- und Weichschaumstoffe, Dämm- und Isolierstoffe, Holz, Papier und Pappe, Gummi und Hartgewebe können ohne Gefügebeeinträchtigung verarbeitet werden. Das Wasserstrahlschneiden hat den Vorteil, dass es ohne Wärmeeinfluss in der Schneidzone, keine Randaufhärtung und keine Gefügeveränderung verursacht (**Bild 3**).

Chemisches Abtragen

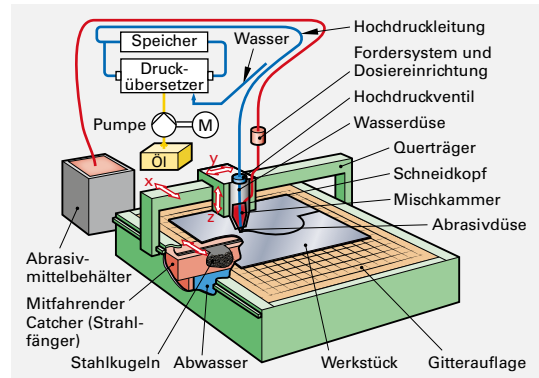
Beim chemischen Abtragen setzt sich der Werkstoff in einer chemischen Reaktion mit dem Wirkmedium zu einer Verbindung um. Diese kann entfernt werden.

Nach DIN 8550 wird das chemische Abtragen unterteilt in:

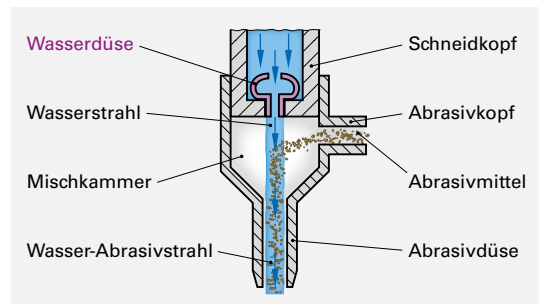
- Ätzabtragen,
- Thermisch-chemisches Entgraten,
- Chemisch-thermisches Abbrennen.

Elektrochemisches Abtragen (ECM)

Beim elektrochemischen Abtragen (Electro Chemical Maching, ECM) werden metallische Werkstoffe unter Einwirkung eines elektrischen Stromes und einer Elektrolytlösung (elektrisch leitende Flüssigkeit) anodisch aufgelöst. In der Praxis wird ein kathodisch gepoltes Formwerkzeug mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in ein anodisch gepoltes Werkstück eingesenkt (**Bild 4**).



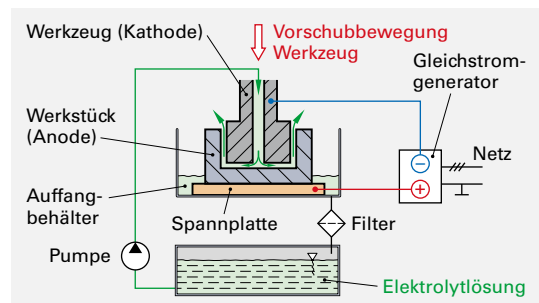
1 Wasserstrahl-Schneidanlage



2 Schneiddüse mit Abrasivmittel



3 Wasserstrahl-Schneiden



4 Prinzip des elektrochemischen Senkens

Prüfen von Maßen, Formen und Lagen

Während und nach der Fertigung von Werkstücken sind entweder deren Maße, die Einhaltung von vorgegebenen Toleranzen oder auch die Lage einzelner Bezugsflächen zueinander zu prüfen.

Für das Messen von Längenmaßen kommen die mechanische, die elektrische, die pneumatische und die optische Messanordnung in Betracht. Die Auswahl der Messgeräte hängt von der konkreten Messaufgabe ab. Dabei ist die geforderte Genauigkeit oft bestimmend.

Mechanische Messmittel

Der Messschieber

Für viele Messaufgaben, bei denen es nicht auf höchste Genauigkeit ankommt, ist der Messschieber ein bewährtes Messgerät. Mit ihm lassen sich Innen-, Außen- und Tiefenmessungen (**Bild 1**) durchführen.

Durch das Aufbringen des Nonius ist es möglich, Messwerte mit einer Genauigkeit von 0,1 mm bis 0,02 mm abzulesen.

Das Prinzip des Nonius (von none = neun) beruht darauf, dass 9 mm in 10 Abschnitte (oder 49 mm in 50 Abschnitte) geteilt werden. Die entsprechenden Skalenteile sind so um 0,1 mm kleiner als auf dem Strichmaßstab des Messschiebers. Der Strich des Nonius, der mit einem Strich des Strichmaßstabes in einer Flucht liegt, zeigt die 1/10 mm, 1/20 mm oder 1/50 mm an (**Bild 2**).

Messschieber werden zunehmend mit einer elektronischen Ziffernanzeige angeboten. Ablesfehler entfallen hier. Die Ziffernanzeige kann meist wahlweise in Millimeter oder Zoll erfolgen. Regeln zum Umgang mit dem Messschieber hängen meist in den Werkstätten aus.

Messschrauben

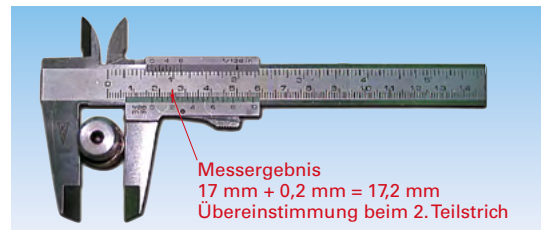
Messschrauben werden angewendet, wenn durch unmittelbares Messen auf 0,01 mm genau gemessen werden soll (**Bild 3**).

Als Maßverkörperung dient bei den Messschrauben eine Messspindel (Gewindespindel). Diese hochgenaue, gehärtete und geschliffene Spindel hat meist eine Steigung von 0,5 mm. Die um die Messspindel liegende Skalentrommel ist mit 50 Teilstrichen versehen, eine Längenänderung von 0,01 mm wird durch das Nachstellen der Messspindel um einen Teilstrich auf der Skalentrommel registriert. Durch das Addieren der ganzen und halben Millimeter von der Skalenhülse mit den hundertstel Millimetern von der Skalentrommel wird das exakte Messergebnis ermittelt. Messschrauben werden auch für das Innenmessen verwendet. Wegen des schwierigen Messens und um Messfehler zu vermeiden werden selbstzentrierende Messschrauben verwendet (**Bild 4**).

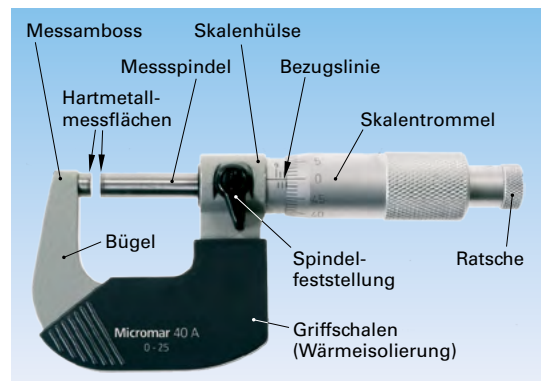


Anwendung:
Nach außen gewinkelte Messflächen zur Messung von Einstichen in Bohrungen.

1 Innenmessen mit dem Sondermessschieber



2 Ablesen des Nonius



3 Bügelmessschraube für Außenmessung



4 Innenmessschraube mit elektronischer Ziffernanzeige

Messschraube mit Feinzeiger

Für höhere Ansprüche an die Genauigkeit sind die Messschrauben mit Feinzeigern versehen.

Damit kann bei Serienteilen die Einhaltung der Toleranzen festgestellt werden. Der Messbereich des Feinzeigers liegt allerdings meist bei $50\ \mu\text{m}$ (**Bild 1**).

Deshalb ist das Unterschiedsmessen anzuwenden. Die Messschraube wird mit Parallelendmaßen eingestellt. Dann kann die Differenz des Maßes des Werkstückes mit dem voreingestellten Maß ermittelt werden. Toleranzmarken, die die erlaubten Höchst- und Mindestmaße repräsentieren, machen das genaue Ablesen des Messwertes überflüssig.

Die Messuhr

Bei der Messuhr wird der durch die Längenänderung am Werkstück hervorgerufene Weg des Messbolzens über ein Übersetzungssystem vergrößert.

Sie enthält keine absoluten Maßverkörperungen wie der Messschieber oder die Messschraube. Für das Messen wird immer eine Bezugsbasis benötigt, z. B. Parallelendmaße. Über Unterschiedsmessen wird das Maß des Messobjektes ermittelt. Auf zwei getrennten Skalen lassen sich ganze und Hundertstel mm ablesen. Digitale Messuhren erleichtern auch hier das Messen (**Bild 2**).

Die Feinzeiger

Die genauesten mechanischen Messgeräte sind die Feinzeiger.

Die unter den verschiedensten Firmennamen angebotenen Feinzeiger können sogar auf weniger als ein Tausendstel Millimeter genau messen (Skw bis $0,5\ \mu\text{m}$) (**Bild 3**). Diese hohe Genauigkeit wird durch ein Übersetzungsverhältnis aus Hebeln und Zahnrädern erreicht. Daraus ergeben sich sehr kleine Anzeige- und Messbereiche.

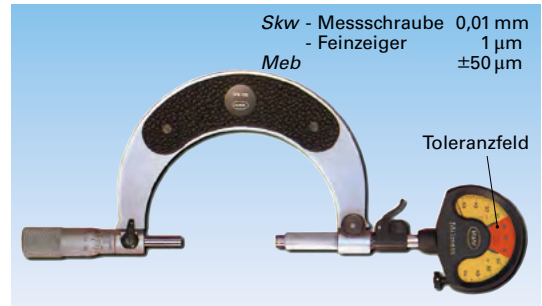
Messuhren und Feinzeiger dienen auch zum Feststellen von Form- und Lageabweichungen.

Elektronische Messmittel

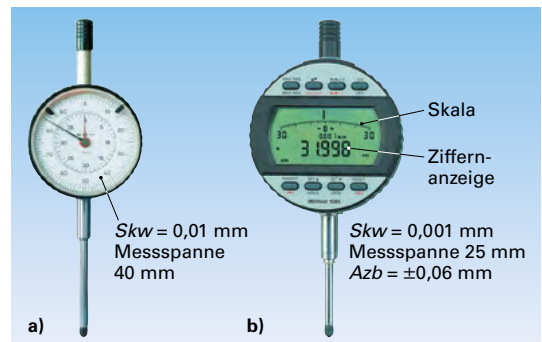
Die elektronischen Messgeräte, die meist mit dem induktiven Messsystem arbeiten, sind in unterschiedlichen Messverfahren einzusetzen. Für die Längenmessung sind interessant:

Einzelmessung: Ein einzelner Messtaster wird wie eine Messuhr zur Längen-(Dicken-)messung genutzt.

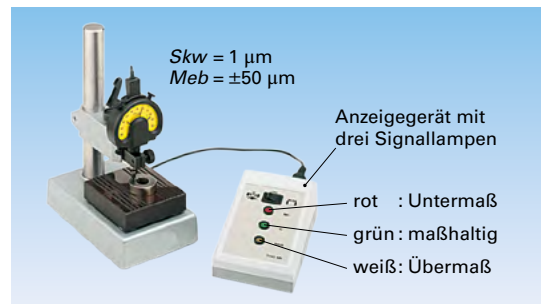
Summenmessung: Aus der Summe der von zwei Messtastern gemessenen Werte wird der Messwert ermittelt. Messfehler werden so eingegrenzt (**Bild 4**).



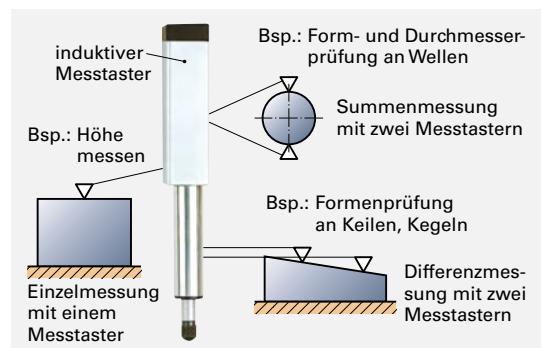
1 Messschraube mit Feinzeiger und Toleranzfeld



2 a) Langweg-Messuhr mit großem Messbereich
b) Digitale Messuhr mit Ziffern- und Skalenanzeige



3 Feinzeiger mit zwei Grenzkontakten



4 Messen mit elektronischen Messgeräten

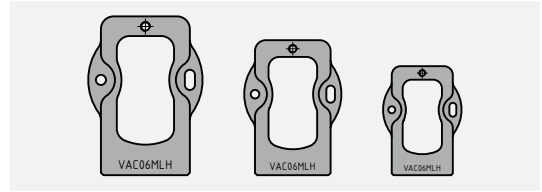
Für die Herstellung der Maschinenschraubstücke in unterschiedlichen Baugrößen muss das Unterprogramm für die Adapterplatten der Teilefamilie grundsätzlich wertfrei geschrieben werden (**Bild 1**). Dazu werden die Zahlenwerte der Programmadressen durch Parameter bzw. Berechnungsvorschriften ersetzt.

Beim Programmieren wird zwischen Benutzerparameter und Systemparameter unterschieden. In PAL werden Benutzerparameter mit dem Adressbuchstaben P gefolgt von einer Zahl zwischen 0 und 9999 programmiert (**Bild 2**). Die Wertzuweisung erfolgt durch Gleichsetzen und die Angabe eines Zahlenwertes oder einer Berechnungsvorschrift. Im Hauptprogramm werden die notwendigen Parameter definiert.

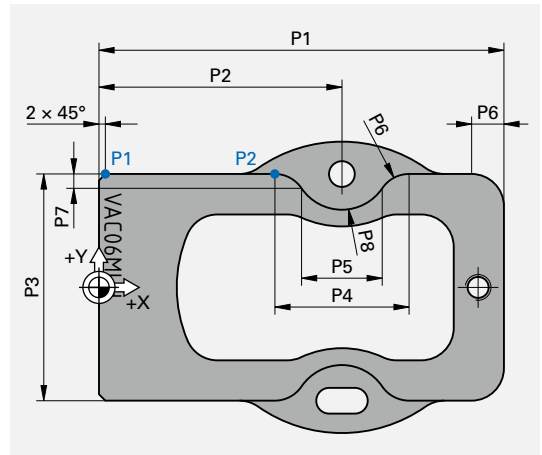
Auf Systemparameter kann während des Programmablaufs lesend zugegriffen werden. Sie werden durch Buchstabenkombinationen dargestellt und enthalten immer die aktuellen Werte. Für die Bearbeitung und die Adresswerte der Anfahr- und Abfahrbedingungen wird im Beispiel der Systemparameter PCR verwendet. So wird sichergestellt, dass die Verfahrbewegungen immer auf das aktuell verwendete Werkzeug abgestimmt sind.

Systemparameter werden auch zum Programmieren von bedingten Programmsprüngen, Wegbedingung G29, verwendet. Dabei werden im Satz nach G29 zwei Adresswerte verglichen, sodass bei einer wahren Aussage der Programmsprung zu der angegebenen Satznummer erfolgt.

Die Wegbedingung G09 – Genauhalt – bei der Konturbeschreibung bewirkt das exakte Anfahren der Koordinatenwerte.



1 Teilefamilie



2 Parameter und UP-Ablauf

Systemparameter Fräsmaschine (Auswahl)

PXA	Aktuelle X-Koordinate absolut
PNX	Aktueller Werkstücknullpunkt in X-Richtung
PF	Aktueller Vorschub
PS	Aktuelle Spindeldrehzahl mit Vorzeichen
PSX	Maximale Spindeldrehzahl
PT	Aktuelle Werkzeugnummer
PCR	Fräserradius

L2002

N01	G41 G47 R=1.5*PCR X=2 Y=P3/2	;Aufruf FRK, Anfahren an P1
N02	G09 G01 X=P2-P4/2	;Anfahren an P2 mit Genauhalt
N03	G02 X=P2-P5/2 Y=P7 R=P6	
N04	G03 X=P2+P5/2 Y=P7 R=P8	
N05	G02 X=P2+P4/2 Y=P3/2 R=P6	
N06	G01 X=P1-P6	
N07	G02 X=P1 Y=P3/2-P6 R=P6	
...		
N17	G01 Y=-P3/2-2	
N18	G01 X=2 Y=P3/2	
N19	G46 G40 D=PCR	;Abwahl FRK, Abfahren von der Kontur
N20	GX=2-3*PCR Y=P3/2+3*PCR	;Anfahren Startpunkt P0
N21	M17	

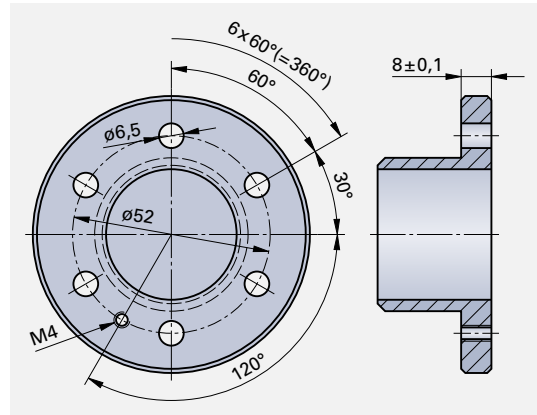
3 Unterprogramm Außenkontur

Drehbearbeitung in der G17-Ebene

Der vorgefertigte Flansch aus S235JR soll durch das Lochbild und das Gewinde fertiggestellt werden (**Bild 1**). Die Steuerung der Maschine wird nach DIN 66025 programmiert. Darüber hinaus stehen Bearbeitungszyklen nach PAL zur Verfügung. Folgende Werkzeuge mit den dazugehörigen Schnittdaten kommen zum Einsatz (**Bild 2**). Die Werkzeuge müssen dazu horizontal in Z-Achsen-Richtung, im Beispiel Richtung Hauptspindel, angeordnet sein und über einen eigenen Antrieb verfügen.

Für die Bearbeitung ist es erforderlich, dass die Drehmaschine über eine C-Achse verfügt. Zur Herstellung der Gewindebohrung wird im Folgenden die G17-Stirnseitenbearbeitung mit Polarkoordinaten in der Fräsbearbeitungsebene G17 C programmiert (**Bild 3**). Die Programmierung der Adresse C ohne Adresswert zeigt an, dass diese Achse kontinuierlich verfahren werden kann. Das Koordinatensystem wird dabei mit der C-Achse nicht mitgedreht. Die Programmierung der Zentrierung und der Kernlochbohrung erfolgt ohne Verwendung von Zyklen. Das Gewindebohren erfolgt mit dem Gewindebohrzyklus G84 (**Bild 4**).

N10	G17 C	;Stirnseite mit Polarkoordinaten
N11	G94 F460 S3800 T01 M03	;Werkzeugaufruf
N12	G00 X26 C240 Z2 M08	;Positionierung
N13	G01 Z-2	;Zentrieren
N14	G00 Z2	;Abheben
N15	G14 H2 M09	
N15	G94 F270 S3380 T02 M03	;Werkzeugaufruf
N16	G00 X0 Y0 Z2 M08	
N17	G01 Z-2	;Bohren
N18	G00 Z2	;Abheben
N19	G14 H2 M09	
N20	S1990 T03 M03	;Werkzeugaufruf
N21	G00 X0 Y0 Z2 M08	
N22	G84 ZA-11 F0.7 M3 V2.1	;Gewindebohrzyklus
N23	G78 IA0 JA0 RP26 AP240	;Aufruf mit Polarkoordinaten
N24	G14 H2 M09	



1 Bearbeitungsaufgabe Flansch

T01: NC-Anbohrer, HSSE $v_c = 40 \text{ m/min}$, $f = 0,12 \text{ mm}$	
T02: Bohrer Ø 3,3 mm, HSS TiN $v_c = 35 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm}$	
T02: Gewindebohrer M4, HSSE $v_c = 25 \text{ m/min}$	
T02: Bohrer Ø 6,5 mm, HSS TiN $v_c = 35 \text{ m/min}$, $f = 0,15 \text{ mm}$	

2 Werkzeugliste Flansch

G17 C HS/GSU

C Ohne Adresswert, kennzeichnet das direkte Programmieren der C-Achse

Optionale Adressen: ¹

HS/GSU Anwahl der Haupt- oder Gegenspindelbearbeitung

Hinweise:

Es können die drei Achsen Z, X und C nur linear mit G0 und G1 verfahren werden. Die gleichzeitige Programmierung von X und C erzeugt spiralförmige Bewegungen auf der Stirnseite.

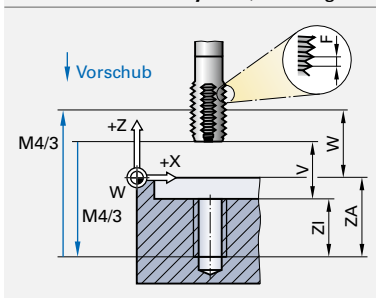
Die X-Koordinate darf auch negativ programmiert werden.

Programmierbare Zyklen:

G81 ... G86 Bohrzyklen des PAL-G17-Programmiersystems (Zyklen sind unter PAL-Fräsen dargestellt)
G73 Kreistaschen- und Zapfenfräszyklus
G79 Zyklusaufruf an aktueller Werkzeugposition (ohne Ebenenkoordinaten)

3 G17 C Stirnseite mit Polarkoordinaten

G84 Gewindebohrzyklus (mit Ausgleichsfutter)



G84 ZI/ZA F M V W S M¹

ZI Gewindetiefe inkrementell ab Materialoberfläche
ZA Gewindetiefe absolut
F Gewindesteigung
M Drehrichtung des Werkzeugs für das Eintauchen
M3 Rechtsgewinde M4 Linksgewinde
V Abstand der Sicherheitsebene von der Materialoberfläche

Optionale Adressen: ¹

W Höhe der Rückzugsebene absolut in Werkstückkoordinaten
S Drehzahl / Schnittgeschwindigkeit
M Zusatzfunktionen

4 Gewindebohrzyklus G84

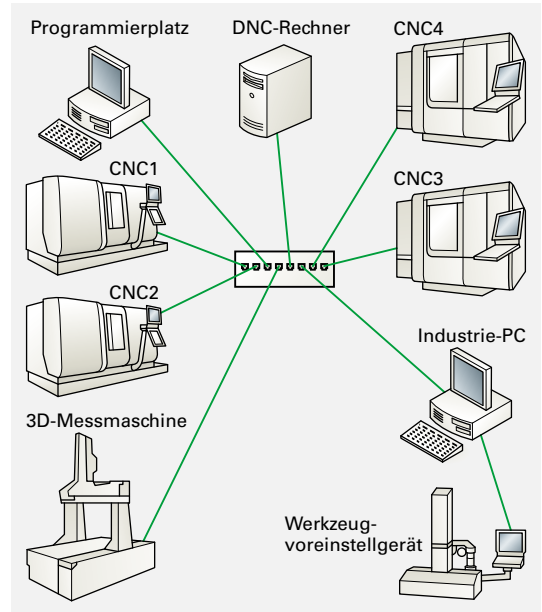
Kommunikation in der Fertigung

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).

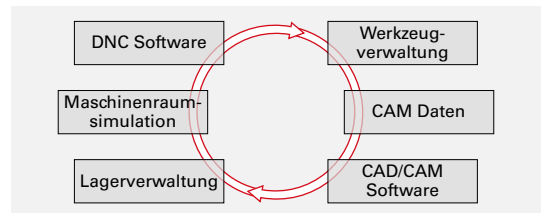
Ist das Werkzeugvoreinstellgerät in das DNC-Netzwerk integriert, können die Messgrößen für jedes Werkzeug im Zentralrechner gespeichert werden. Ergänzt durch Angaben über den Aufbau der Werkzeuge, über Schneidstoffe, zugehörige Spannmittel, Schnittdaten, Ersatzteile usw. entsteht eine Menge von Informationen,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



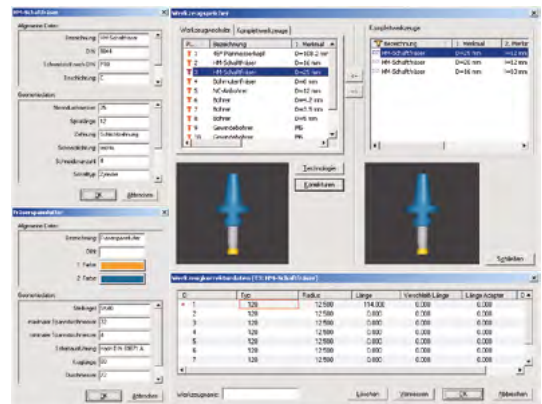
1 DNC-Netzwerk

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

Fertigungsbeispiel

„CNC-Drehprogramm“

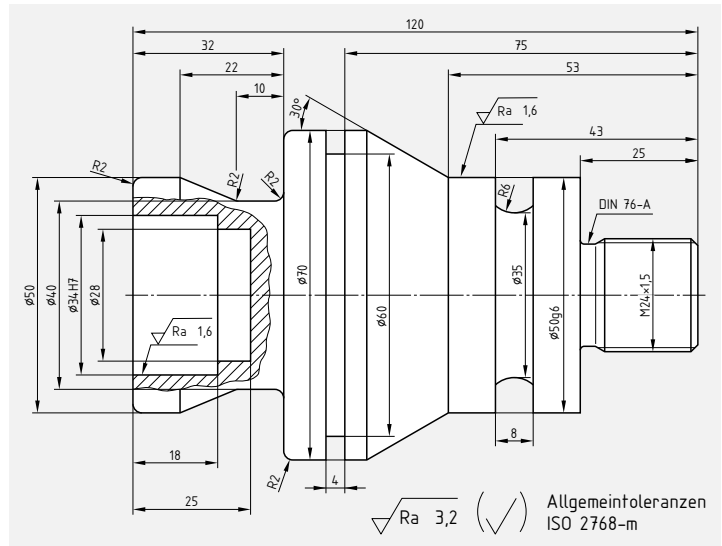
Das folgende Werkstück soll auf einer CNC-Drehmaschine hergestellt werden (**Bild 1**). Die Steuerung der Maschine wird nach DIN 66025 programmiert. Darüber hinaus stehen Bearbeitungszyklen nach PAL zur Verfügung. Entsprechend der in der ersten Aufspannung erforderlichen Fertigungsaufgaben kommen Werkzeuge mit den dazugehörigen Schnittdaten zum Einsatz (**Bild 2**).

Die Fertigung des Drehteils erfolgt in zwei Aufspannungen. In der ersten Aufspannung wird das Drehteil einschließlich dem Durchmesser 70 zuerst vordreht, dann fertiggedreht. Anschließend erfolgt die Bearbeitung der Einstiche und die Herstellung des metrischen Feingewindes M24x1,5. Nach dem Umspannen kann die zweite Seite bearbeitet werden, beginnend mit der Außenkontur, gefolgt vom Vorbohren der Innenkontur.

%5895		;1. Aufspannung
N01	G18 DIA HS	;Wahl der Drehebene ZX
N02	G54	;Nullpunktverschiebung
N03	G96 S120 T01 M06	;Werkzeugaufruf
N04	G92 S5000	;Drehzahlbegrenzung
N05	G90 G00 X85 Z0.5 M04	
N06	G95 F0.5	;Vorschub pro Umdrehung
N07	G01 X-2 M08	;Plandrehen, Schruppen
N08	G00 X80 Z2 M09	
...		

Aufbau und Syntax des Programms an einer CNC-Drehmaschine sind denen an einer CNC-Fräsmaschine prinzipiell gleich. Unterschiede bestehen in verfahrensspezifischen Besonderheiten.

Mit der Wegbedingung G18 wird die ZX-Ebene als Bearbeitungsebene bestimmt. Durch die Adresse DIA wird festgelegt, dass alle X-Werte von Ziel- und Kreismittelpunkten durchmesserbezogen angegeben werden müssen (**Bild 3**). Mit der Adresse HS wird die Hauptspindel als aktuelle Werkstückspindel ausgewählt. Die mit der Wegbedingung G54 programmierte Nullpunktverschiebung bezieht sich dementsprechend auf die Hauptspindel.



1 Fertigungsaufgabe

T01 Schruppdrehmeißel;
HM; $r_e = 0,8$ mm;
 $v_c = 120$ m/min; $f = 0,5$ mm



T02 Formdrehmeißel;
HSS; R6 x 8 mm breit;
 $v_c = 50$ m/min; $f = 0,1$ mm



T03 Schlichtdrehmeißel;
HM; $r_e = 0,4$ mm;
 $v_c = 180$ m/min; $f = 0,2$ mm



T04 Stechdrehmeißel;
HM; $b = 3$ mm;
 $v_c = 100$ m/min; $f = 0,1$ mm



T05 Gewindedrehmeißel;
HM; außen; $P = 1,5$ mm;
 $n = 1000$ /min



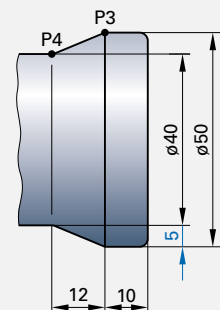
2 Werkzeugliste

G18 DIA
...
G01 Z-22 X40

G18 RAD
...
G01 Z-22 X-5

G18 DRA
G90
...
G01 Z-22 X40/XA40/XI-5

G18 DRA
G91
...
G01 Z-12 X-5/XA40/XI-5



3 Angabe der X-Koordinaten