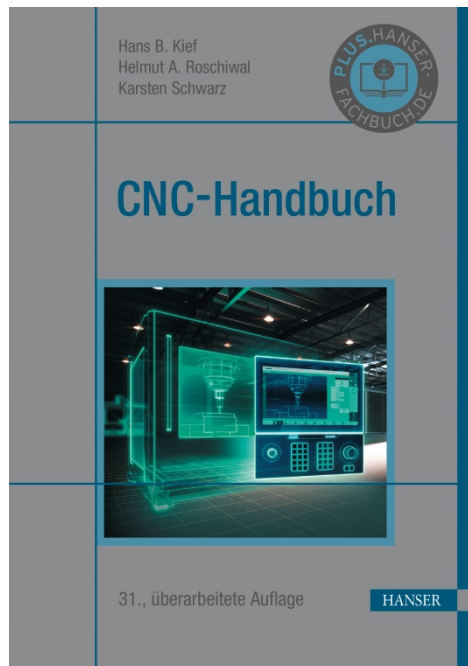


# HANSER



## Leseprobe

zu

## „CNC-Handbuch“

von Hans B. Kief et al.

Print-ISBN: 978-3-446-45877-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-46524-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45877-2>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

## Vorwort zur 31. Auflage

Die CNC-unterstützte Fertigung ist heute das Rückgrat der weltweiten Produktion. Mit Hilfe der internetbasierten Technologien wird die bereits hoch automatisierte Fertigung noch effektiver. Wer heute im Umfeld der zerspanenden oder additiven Fertigungstechnik tätig ist oder sein will, muss deshalb über ein solides technisches Grundwissen der CNC-Technik verfügen. Man muss verstehen, wie die einzelnen Komponenten einer CNC-Maschine funktionieren und wie sich diese auf das Gesamtsystem und die Qualität der gefertigten Werkstücke sowie auf die spätere Rentabilität der Produktion auswirken.

Die Digitalisierung verändert alle Lebensbereiche – auch die Fertigung. Der Begriff Industrie 4.0 steht dabei als Synonym für den Einsatz der Internettechnologien im Umfeld der industriellen Fertigung weltweit. Bereits die Planung CNC-gestützter Fertigungssysteme beginnt mit einer anspruchsvollen Kommunikation zwischen Maschinenhersteller und Anwender. Dabei steht oft nicht die Vollautomatisierung im Vordergrund, sondern die Suche nach der technisch passenden und rentabel produzierenden, wirtschaftlichen Lösung. Dafür sind gute Kenntnisse der Terminologie unverzichtbar. Zudem besteht der Anspruch, die mit dieser Technik gebotenen umfangreichen Möglichkeiten auch tatsächlich nut-

zen zu können. Der Prozess der Planung, Konstruktion und Inbetriebnahme wird durch digitale Tools unterstützt. Als Ergebnis der Projektierung entwickeln Maschinenhersteller digitale Zwillinge ihrer Maschinenreihen und können so flexibler auf Kundenanforderungen reagieren. Mit Hilfe des digitalen Zwillings kann der Anwender seine Fertigung fast vollständig vorbereiten, ohne die reale Maschine dafür mit unproduktiven Aufgaben belegen zu müssen.

Auch wenn durch die zunehmende Digitalisierung und den Einsatz von künstlicher Intelligenz Standardaufgaben in der Herstellung und Nutzung von CNC-Maschinen immer mehr verschwinden, so sind noch immer gut qualifizierte Menschen gefragt, die passende Lösungen entwickeln, planen, perfektionieren und dabei die spätere Rentabilität nicht aus dem Blick verlieren. Auf der Seite des Anwenders zählen dazu sowohl die Bediener und Programmierer als auch die für Betrieb, Wartung und Instandhaltung zuständigen Fachkräfte. Ihr solides Fachwissen und das Verständnis für das Zusammenwirken sind Voraussetzung, um den Betrieb solcher Fertigungssysteme stets funktionsfähig und rentabel zu gestalten.

Diesem anspruchsvollen Personenkreis haben wir unser Buch gewidmet.

*Hans B. Kief*

*Helmut A. Roschival*

*Karsten Schwarz*

*Die drei Herausgeber sind Ingenieure und Fachautoren mit vielen Jahren bereichsübergreifender Erfahrungen auf den Gebieten Entwicklung von CNC-Maschinen und -Steuerungen, Planung von FMS, dem Einsatz der CNC/CAD/CAM-Technik, Vernetzung und Automatisierung, sowie Schulung und Fortbildung für Manager, Industriepersonal und Studenten.*

# Inhaltsübersicht

\* aktualisiert, \*\* neuer Beitrag

<b>Teil 1</b>	<b>Einführung in die CNC-Technik</b>	19
	1 Historische Entwicklung der NC-Fertigung	21
*	2 Meilensteine der NC-Entwicklung	37
	3 Was ist NC und CNC?	41
<b>Teil 2</b>	<b>Funktionen der CNC</b>	65
*	1 Weginformationen, Wegmessung	67
	2 Schaltfunktionen	103
*	3 Betriebsfunktionen	117
	4 SPS – Speicherprogrammierbare Steuerungen	185
**	5 Einfluss der CNC auf Baugruppen der Maschine	207
<b>Teil 3</b>	<b>Elektrische Antriebe für CNC-Werkzeugmaschinen</b>	215
	1 Antriebsregelung für CNC-Werkzeugmaschinen	217
	2 Vorschubantriebe für CNC-Werkzeugmaschinen	235
	3 Hauptspindelantriebe	253
*	4 Dimensionierung von Antrieben für Werkzeugmaschinen	261
*	5 Mechanische Auslegung der Hauptspindel anhand der Prozessparameter	271
<b>Teil 4</b>	<b>Numerisch gesteuerte Maschinen und Fertigungssysteme</b>	283
*	1 CNC-Werkzeugmaschinen	285
*	2 Additive Fertigungsverfahren	367
	3 Flexible Fertigungssysteme	395
*	4 Industrieroboter und Handhabung	439
	5 Energieeffiziente wirtschaftliche Fertigung	461

<b>Teil 5</b>	<b>Werkzeuge in der CNC-Fertigung</b>	471
	1 Aufbau der Werkzeuge	473
	2 Werkzeugverwaltung (Tool Management)	501
	3 Maschinenintegrierte Werkstückmessung und Prozessregelung	529
**	4 Maschinenintegrierte Werkstückmessung in der Serienfertigung	545
	5 Lasergestützte Werkzeugüberwachung	553
<b>Teil 6</b>	<b>NC-Programm und Programmierung</b>	559
*	1 NC-Programm	561
**	2 Programmierung von CNC-Maschinen	607
	3 NC-Programmiersysteme	629
	4 Fertigungssimulation	647
<b>Teil 7</b>	<b>Von der betrieblichen Informationsverarbeitung zu Industrie 4.0</b>	665
	1 DNC – Direct Numerical Control oder Distributed Numerical Control	667
	2 LAN – Local Area Networks	683
*	3 Digitale Produktentwicklung und Fertigung: Von CAD und CAM zu PLM	701
*	4 Industrie 4.0	719
**	5 Der Weg zur Digitalisierung in der CNC-Werkzeugmaschinen- Branche	737
	6 Industrie 4.0 im mittelständischen Fertigungsbetrieb	759
<b>Teil 8</b>	<b>Anhang</b>	771
	Richtlinien, Normen, Empfehlungen	773
*	NC-Fachwortverzeichnis	781
	Abkürzungsverzeichnis	827
*	Stichwortverzeichnis	829
*	Empfohlene NC-Literatur	839
	Inserentenverzeichnis	842

# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenübersicht</b> .....	17
<b>Videoübersicht</b> .....	18
<b>Teil 1 Einführung in die CNC-Technik</b> .....	19
<b>1 Historische Entwicklung der NC-Fertigung</b> .....	21
1.1 Erste Nachkriegsjahre .....	21
1.2 Wiederaufbau der Werkzeugmaschinenindustrie .....	22
1.3 Die Werkzeugmaschinenindustrie in Ostdeutschland .....	22
1.4 Weltweite Veränderungen .....	24
1.5 Weiterentwicklung der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie .....	24
1.6 Der japanische Einfluss .....	27
1.7 Die deutsche Krise .....	27
1.8 Ursachen und Auswirkungen .....	28
1.9 Flexible Fertigungssysteme .....	29
1.10 Weltwirtschaftskrise 2009 .....	30
1.11 Situation und Ausblick .....	33
1.12 Fazit .....	34
<b>2 Meilensteine der NC-Entwicklung</b> .....	37
<b>3 Was ist NC und CNC?</b> .....	41
3.1 Der Weg zu NC .....	41
3.2 Hardware .....	42
3.3 Software .....	43
3.4 Steuerungsarten .....	44
3.5 NC-Achsen .....	46
3.6 SPS, PLC .....	49
3.7 Anpassteil .....	49
3.8 Computer und NC .....	50
3.9 NC-Programm und Programmierung .....	52
3.10 Dateneingabe .....	55
3.11 Bedienung .....	55
3.12 Programmierung .....	57
3.13 Zusammenfassung .....	59
<b>Teil 2 Funktionen der CNC</b> .....	65
<b>1 Weginformationen, Wegmessung</b> .....	67
1.1 Einführung .....	67
1.2 Achsbezeichnung .....	67
1.3 Lageregelkreis .....	70
1.4 Positionsmessung .....	73

1.5	Einfache Diagnose von Messgeräten	86
1.6	Kompensationen	88
<b>2</b>	<b>Schaltfunktionen</b>	<b>103</b>
2.1	Erläuterungen	103
2.2	Werkzeugwechsel	104
2.3	Werkzeugwechsel bei Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren	104
2.4	Werkzeugwechsel bei Drehmaschinen	108
2.5	Werkzeugplatzcodierung	108
2.6	Werkstückwechsel	109
2.7	Drehzahlwechsel	113
2.8	Vorschubgeschwindigkeit	113
2.9	Zusammenfassung	114
<b>3</b>	<b>Betriebsfunktionen</b>	<b>117</b>
3.1	Definition	117
3.2	CNC-Grundfunktionen	117
3.3	CNC-Sonderfunktionen	123
3.4	Kollisionsvermeidung	127
3.5	Integrierte Sicherheitskonzepte für CNC-Maschinen	136
3.6	Zustandsüberwachung und Maschinendatenerfassung	158
3.7	Anzeigen in CNCs	163
3.8	Touch-Bedienung der CNC	166
3.9	CNC-Bedienoberflächen ergänzen	167
3.10	Elektronische Schüsselsysteme für die sichere Betriebsartenwahl	171
3.11	Offene Steuerungen	173
3.12	Einsatz von OPC UA in der CNC-Werkzeugmaschine	176
3.13	Preisbetrachtung	178
3.14	Vorteile neuester CNC-Entwicklungen	180
3.15	Zusammenfassung	181
<b>4</b>	<b>SPS – Speicherprogrammierbare Steuerungen</b>	<b>185</b>
4.1	Definition	185
4.2	Entstehungsgeschichte der SPS	185
4.3	Aufbau und Wirkungsweise der SPS und SPS-Module	186
4.4	Datenbus und Feldbus	189
4.5	Vorteile von SPS	194
4.6	Programmierung von SPS und Dokumentation	194
4.7	Programm	197
4.8	Programmspeicher	198
4.9	SPS, CNC und PC im integrierten Betrieb	199
4.10	SPS-Auswahlkriterien	200
4.11	Zusammenfassung	202
4.12	Tabellarischer Vergleich CNC/SPS	202
<b>5</b>	<b>Einfluss der CNC auf Baugruppen der Maschine</b>	<b>207</b>
5.1	Maschinenkonfiguration	207
5.2	Maschinengestelle	209
5.3	Führungen	210

5.4	Maschinenverkleidung .....	212
5.5	Kühlmittelversorgung .....	213
5.6	Späneabfuhr .....	213
5.7	Zusammenfassung .....	213
<b>Teil 3 Elektrische Antriebe für CNC-Werkzeugmaschinen .....</b>		<b>215</b>
<b>1</b>	<b>Antriebsregelung für CNC-Werkzeugmaschinen .....</b>	<b>217</b>
1.1	Definition .....	217
1.2	Achsmechanik .....	218
1.3	Analoge Regelung .....	219
1.4	Analoge vs. Digitale Regelung .....	220
1.5	Digitale intelligente Antriebstechnik .....	221
1.6	Reglertypen und Regelverhalten .....	223
1.7	Kreisverstärkung und $K_V$ -Faktor .....	225
1.8	Vorsteuerung .....	226
1.9	Frequenzumrichter .....	226
1.10	Zusammenfassung .....	231
<b>2</b>	<b>Vorschubantriebe für CNC-Werkzeugmaschinen .....</b>	<b>235</b>
2.1	Anforderungen an Vorschubantriebe .....	236
2.2	Arten von Vorschubantrieben .....	237
2.3	Die Arten von Linearmotoren .....	243
2.4	Vor-/Nachteile von Linearantrieben .....	245
2.5	Anbindung der Antriebe an die CNC .....	246
2.6	Messgeber .....	248
2.7	Zusammenfassung .....	249
<b>3</b>	<b>Hauptspindelantriebe .....</b>	<b>253</b>
3.1	Anforderungen an Hauptspindelantriebe .....	253
3.2	Arten von Hauptspindelantrieben .....	254
3.3	Bauformen von Hauptspindelantrieben .....	255
3.4	Ausführungen von Drehstrom-Synchronmotoren .....	258
3.5	Vor- und Nachteile von Synchronmotoren .....	258
<b>4</b>	<b>Dimensionierung von Antrieben für Werkzeugmaschinen .....</b>	<b>261</b>
4.1	Vorgehensweise .....	261
4.2	Dimensionierung von Hauptspindelantrieben .....	266
4.3	Zusammenfassung .....	268
<b>5</b>	<b>Mechanische Auslegung der Hauptspindel anhand der Prozessparameter .....</b>	<b>271</b>
5.1	Motorenauswahl .....	271
5.2	Lagerung .....	272
5.3	Schmierung .....	273
5.4	Bearbeitungsprozesse .....	273
5.5	Anforderungen an die Hauptspindel bezüglich Industrie 4.0 .....	278

<b>Teil 4</b>	<b>Numerisch gesteuerte Maschinen und Fertigungssysteme</b>	283
<b>1</b>	<b>CNC-Werkzeugmaschinen</b>	285
1.1	Bearbeitungszentren, Fräsmaschinen	285
1.2	Drehmaschinen	298
1.3	Schleifmaschinen	305
1.4	Verzahnmaschinen	314
1.5	Bohrmaschinen	322
1.6	Sägemaschinen	324
1.7	Laserbearbeitungsanlagen	326
1.8	Stanz- und Nibbelmaschinen	333
1.9	Rohrbiegemaschinen	338
1.10	Funkenerosions-maschinen	339
1.11	Elektronenstrahl-Maschinen	342
1.12	Wasserstrahlschneidmaschinen	344
1.13	Multitasking-Maschinen	346
1.14	Messen und Prüfen	358
1.15	Zusammenfassung	362
<b>2</b>	<b>Additive Fertigungsverfahren</b>	367
2.1	Einführung	367
2.2	Definition	368
2.3	Verfahrenskette	370
2.4	Einteilung der generativen Fertigungsverfahren	374
2.5	Die wichtigsten Schichtbauverfahren	375
2.6	Vorteile der Additiven Fertigungsverfahren	385
2.7	Anwendungen	388
2.8	Neuere Verfahren	388
2.9	Arbeits-Vorbereitung	391
2.10	Einbindung in die Fertigung	392
2.11	Zusammenfassung	393
<b>3</b>	<b>Flexible Fertigungssysteme</b>	395
3.1	Definition	395
3.2	Flexible Fertigungszellen	398
3.3	Flexible Fertigungssysteme	398
3.4	Technische Kennzeichen von FFS	405
3.5	FFS-Einsatzkriterien	406
3.6	Fertigungsprinzipien	408
3.7	Maschinenauswahl und -anordnung	410
3.8	Werkstücktransportsysteme	411
3.9	FFS-Anforderungen an CNCs	419
3.10	FFS-Leitrechner	420
3.11	Wirtschaftliche Vorteile von FFS	422
3.12	Probleme und Risiken bei der Auslegung von FFS	423
3.13	Flexibilität und Komplexität	425
3.14	Simulation von FFS	428
3.15	Produktionsplanungssysteme (PPS)	432



3.16	Planung flexibler Fertigungssysteme .....	433
3.17	Zusammenfassung .....	435
<b>4</b>	<b>Industrieroboter und Handhabung .....</b>	<b>439</b>
4.1	Einführung .....	439
4.2	Definition: Was ist ein Industrieroboter? .....	440
4.3	Aufbau von Industrierobotern .....	440
4.4	Mechanik/Kinematik .....	442
4.5	Greifer oder Effektor .....	442
4.6	Steuerung .....	444
4.7	Safe Robot Technologie .....	447
4.8	Programmierung .....	449
4.9	Sensoren .....	451
4.10	Anwendungsbeispiele von Industrierobotern .....	452
4.11	Anbindung von Robotern an Werkzeugmaschinen .....	454
4.12	Roboter mit CNC-Anforderungen .....	456
4.13	Einsatzkriterien für Industrieroboter .....	456
4.14	Zusammenfassung und Ausblick .....	458
<b>5</b>	<b>Energieeffiziente wirtschaftliche Fertigung .....</b>	<b>461</b>
5.1	Einführung .....	461
5.2	Was ist Energieeffizienz? .....	461
5.3	Werkhallen .....	461
5.4	Maschinenpark .....	462
5.5	Sonderfall Bearbeitungszentren .....	462
5.6	Energieeffiziente NC-Programme .....	463
5.7	Möglichkeiten der Maschinenhersteller .....	464
5.8	Möglichkeiten der Anwender .....	465
5.9	Blindstrom-Kompensation .....	467
5.10	Zusammenfassung .....	469
5.11	Ausblick .....	469
<b>Teil 5</b>	<b>Werkzeuge in der CNC-Fertigung .....</b>	<b>471</b>
<b>1</b>	<b>Aufbau der Werkzeuge .....</b>	<b>473</b>
1.1	Einführung .....	473
1.2	Anforderungen .....	473
1.3	Gliederung der Werkzeuge .....	476
1.4	Maschinenseitige Aufnahmen .....	481
1.5	Modulare Werkzeugsysteme .....	485
1.6	Einstellbare Werkzeuge .....	486
1.7	Gewindefräsen .....	490
1.8	Sonderwerkzeuge .....	492
1.9	Werkzeugwahl .....	499
<b>2</b>	<b>Werkzeugverwaltung (Tool Management) .....</b>	<b>501</b>
2.1	Motive zur Einführung .....	501
2.2	Evaluation einer Werkzeugverwaltung .....	502

2.3	Lastenheft .....	503
2.4	Beurteilung von Lösungen .....	504
2.5	Einführung einer Werkzeugverwaltung .....	504
2.6	Gliederung .....	504
2.7	Integration .....	505
2.8	Werkzeugidentifikation .....	505
2.9	Werkzeuge suchen .....	506
2.10	Werkzeugklassifikation .....	507
2.11	Werkzeugkomponenten .....	508
2.12	Komplettwerkzeuge .....	510
2.13	Werkzeuglisten .....	511
2.14	Arbeitsgänge .....	512
2.15	Werkzeu gvoreinstellung .....	512
2.16	Werkzeuglogistik .....	514
2.17	Elektronische Werkzeugidentifikation .....	518
2.18	Zusammenfassung .....	526
<b>3</b>	<b>Maschinenintegrierte Werkstückmessung und Prozessregelung .....</b>	<b>529</b>
3.1	Einführung .....	529
3.2	Ansatzpunkte für die Prozessregelung .....	529
3.3	Einsatzbereiche von Werkstück- und Werkzeugmesssystemen .....	530
3.4	Werkstückmesssysteme für Werkzeugmaschinen .....	536
<b>4</b>	<b>Maschinenintegrierte Werkstückmessung in der Serienfertigung .....</b>	<b>545</b>
4.1	Einführung .....	545
4.2	Bohrungsmessköpfe für kürzeste Messzeiten bei der Bohrungsherstellung ..	546
4.3	Rauheitsmessgeräte für die automatisierte Prüfung von Oberflächen .....	547
4.4	DIGILOG-Messtaster für digitale und analoge Messwerterfassung .....	548
4.5	Höchste Produktivität durch simultanes Messen .....	550
4.6	Zusammenfassung .....	550
<b>5</b>	<b>Lasergestützte Werkzeugüberwachung .....</b>	<b>553</b>
5.1	Einführung .....	553
5.2	Bruchüberwachung .....	554
5.3	Einzelschneidenkontrolle .....	554
5.4	Werkzeugmessung .....	555
5.5	Messung von HSC-Werkzeugen .....	555
5.6	Kombinierte Lasermesssysteme .....	556
5.7	Zusammenfassung .....	557
<b>Teil 6</b>	<b>NC-Programm und Programmierung .....</b>	<b>559</b>
<b>1</b>	<b>NC-Programm .....</b>	<b>561</b>
1.1	Definitionen .....	561
1.2	Struktur der NC-Programme .....	562
1.3	Programmaufbau, Syntax und Semantik .....	563
1.4	Schaltbefehle (M-Funktionen) .....	564
1.5	Weginformationen .....	566

1.6	Wegbedingungen (G-Funktionen) .....	567
1.7	Zyklen .....	570
1.8	Nullpunkte und Bezugspunkte .....	571
1.9	Transformationen .....	588
1.10	Werkzeugkorrekturen .....	592
1.11	DXF-Konverter .....	594
1.12	CNC-Hochsprachenprogrammierung .....	600
1.13	Zusammenfassung .....	603
<b>2</b>	<b>Programmierung von CNC-Maschinen</b> .....	<b>607</b>
2.1	Definition der NC-Programmierung .....	607
2.2	Programmiermethoden .....	607
2.3	CAM-basierte CNC-Zerspanungsstrategien .....	614
2.4	Arbeitserleichternde Grafiken .....	623
2.6	Auswahl des geeigneten Programmiersystems .....	625
2.7	Zusammenfassung .....	626
<b>3</b>	<b>NC-Programmiersysteme</b> .....	<b>629</b>
3.1	Einleitung .....	629
3.2	Bearbeitungsverfahren im Wandel .....	630
3.3	Der Einsatzbereich setzt die Prioritäten .....	631
3.4	Eingabedaten aus unterschiedlichen Quellen .....	633
3.5	Leistungsumfang eines modernen NC-Programmiersystems (CAM) .....	633
3.6	Datenmodelle auf hohem Niveau .....	633
3.7	CAM-orientierte Geometrie-Manipulation .....	634
3.8	Nur leistungsfähige Bearbeitungsstrategien zählen .....	635
3.9	Adaptives Bearbeiten .....	636
3.10	3D-Modelle bieten mehr .....	636
3.11	3D-Schnittstellen .....	637
3.12	Innovativ mit Feature-Technik .....	637
3.13	Automatisierung in der NC-Programmierung .....	638
3.14	Werkzeuge .....	641
3.15	Aufspannplanung und Definition der Reihenfolge .....	642
3.16	Die Simulation bringt es auf den Punkt .....	642
3.17	Postprozessor .....	643
3.18	Erzeugte Daten und Schnittstellen zu den Werkzeugmaschinen .....	644
3.19	Zusammenfassung .....	644
<b>4</b>	<b>Fertigungssimulation</b> .....	<b>647</b>
4.1	Einleitung .....	647
4.2	Qualitative Abgrenzung der Systeme .....	648
4.3	Komponenten eines Simulationsszenarios .....	651
4.4	Ablauf der NC-Simulation .....	654
4.5	Integrierte Simulationssysteme .....	656
4.6	Einsatzfelder .....	656
4.7	Zusammenfassung .....	661

<b>Teil 7</b>	<b>Von der betrieblichen Informationsverarbeitung zu Industrie 4.0</b>	665
<b>1</b>	<b>DNC – Direct Numerical Control oder Distributed Numerical Control</b>	667
1.1	Definition	667
1.2	Aufgaben von DNC	667
1.3	Einsatzkriterien für DNC-Systeme	668
1.4	Datenkommunikation mit CNC-Steuerungen	669
1.5	Technik des Programmanforderns	670
1.6	Heute angebotene DNC-Systeme	671
1.7	Netzwerktechnik für DNC	672
1.8	Vorteile beim Einsatz von Netzwerken	675
1.9	NC-Programmverwaltung	675
1.10	Vorteile des DNC-Betriebes	679
1.11	Kosten und Wirtschaftlichkeit von DNC	679
1.12	Stand und Tendenzen	680
1.13	Zusammenfassung	680
<b>2</b>	<b>LAN – Local Area Networks</b>	683
2.1	Einleitung	683
2.2	Local Area Network (LAN)	683
2.3	Was sind Informationen?	683
2.4	Kennzeichen und Merkmale von LAN	686
2.5	Gateway und Bridge	693
2.6	Auswahlkriterien eines geeigneten LANs	694
2.7	Schnittstellen	694
2.8	Zusammenfassung	697
<b>3</b>	<b>Digitale Produktentwicklung und Fertigung: Von CAD und CAM zu PLM</b>	701
3.1	Einleitung	701
3.2	Begriffe und Geschichte	702
3.3	Digitale Produktentwicklung	707
3.4	Digitale Fertigung	711
3.5	Zusammenfassung	716
<b>4</b>	<b>Industrie 4.0</b>	719
4.1	Grundlagen	719
4.2	Kernelemente der Industrie 4.0	723
4.3	Industrie 4.0 in der Fertigung	730
4.4	Ein MES als Baustein der Industrie 4.0	732
4.5	Herausforderungen und Risiken von Industrie 4.0	734
<b>5</b>	<b>Der Weg zur Digitalisierung in der CNC-Werkzeugmaschinen-Branche</b>	737
5.1	Auswirkungen der gesellschaftlichen Veränderungen	737
5.2	Digitalisierung der Prozesse in der CNC-Fertigung	739
5.3	Der Digitale Zwilling einer Werkzeugmaschine	748
5.4	Sensorik für CNC-Maschinen als Voraussetzung für I4.0	752

<b>6</b>	<b>Industrie 4.0 im mittelständischen Fertigungsbetrieb</b>	759
6.1	Voraussetzung für Industrie 4.0	759
6.2	Nutzen von Industrie 4.0	761
6.3	Cyber-Physical-Systems (CPS), das „Internet der Dinge“	761
6.4	Sechzehn Fallbeispiele zu Industrie 4.0	761
6.5	Ein Arbeitstag mit Industrie 4.0	767
6.6	Zusammenfassung	768
<b>Teil 8</b>	<b>Anhang</b>	771
	<b>Richtlinien, Normen, Empfehlungen</b>	773
1.	VDI-Richtlinien	773
2.	VDI/NCG-Richtlinien	775
3.	DIN – Deutsche Industrie Normen	777
	<b>NC-Fachwortverzeichnis</b>	781
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	827
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	829
	<b>Empfohlene NC-Literatur</b>	839
	<b>Inserentenverzeichnis</b>	842



Bild 1.34: Sensorbox zur Messung von Temperatur an einem Rundtisch mit Torquemotor.  
(Quelle: Heidenhain)

## 1.6 Kompensationen

Die Genauigkeit von Werkzeugmaschinen wird durch **mechanisch bedingte Abweichungen** von der idealen Geometrie oder **Fehler in der Kraftübertragung** und in den **Messsystemen** beeinträchtigt. Bei der Werkstückbearbeitung können **Temperaturunterschiede** und **mechanische Kräfte** zu Präzisionsverlusten führen.

Ein Teil dieser systematischen Abweichungen lässt sich in der Regel bei der Inbetriebnahme der Maschine messen und während des Betriebs kompensieren, gestützt auf die Lage-Istwert-Geber und zusätzliche Sensorik. Dazu besitzen moderne CNCs achsspezifische wirksame Kompensationsfunktionen. Allerdings sollte beachtet werden, dass Kompensationen durch die CNC lediglich ein **Hilfsmittel für Korrekturen in begrenzten Umfängen** ist. Für die Präzision einer Maschine ist in erster Linie die mechanische Konstruktion und deren Genauigkeit verantwortlich.

Es stehen folgende Kompensationsfunktionen zur Verfügung:

- Losekompensation
- Spindelsteigungsfehlerkompensation
- Reibkompensation (Quadrantenfehlerkompensation)

- Kompensation von Durchhang- und Winkligkeitsfehlern
- Temperaturkompensation
- Volumenkompensation
- Nick und Gear-Kompensation
- Dynamische Vorsteuerung (Schleppfehler-Kompensation)
- Elektronischer Gewichtsausgleich
- Kompensation dynamischer Abweichungen

Die Kompensationsfunktionen lassen sich für jede Maschine mit Hilfe von Maschinenparametern individuell einstellen. Die normale Ist- und Sollpositionsanzeige berücksichtigt die Kompensationswerte nicht und zeigt die Positionswerte einer „idealen Maschine“ an.

### Losekompensationen

(Bild 1.35 und 1.36)

Bei der Kraftübertragung zwischen einem bewegten Maschinenteil und seinem Antrieb (z. B. Kugelrollspindel) tritt Umkehrspiel (Lose) auf. Eine völlig spielfreie Einstellung der Mechanik ist unmöglich und hätte einen zu hohen Verschleiß zur Folge. Auch in der Verbindung zwischen dem Maschinenteil und dem Messsystem treten

## Positive Lose

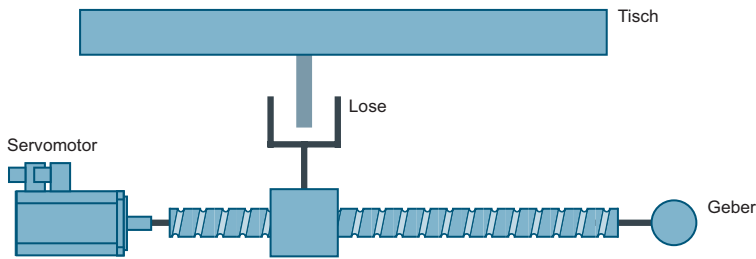


Bild 1.35: Das mechanische Umkehrspiel beeinflusst die Qualität der Werkzeugmaschine: Der Geber eilt dem Maschinenteil (Tisch) z. B. im Falle der positiven Lose voraus. Da damit auch die vom Geber erfasste Istposition der tatsächlichen Istposition des Tisches vorausseilt, fährt der Tisch in diesem Fall zu kurz.

Lose auf. Diese **mechanischen Lose** können das Bearbeitungsergebnis der Werkzeugmaschine negativ beeinflussen. Eilt zum Beispiel der Geber aufgrund der Lose dem Maschinentisch voraus, wird auch die gemessene Istposition früher erreicht, aber der tatsächliche Verfahrweg des Maschinentisches ist zu kurz, d. h. es entstehen Bearbeitungstoleranzen.

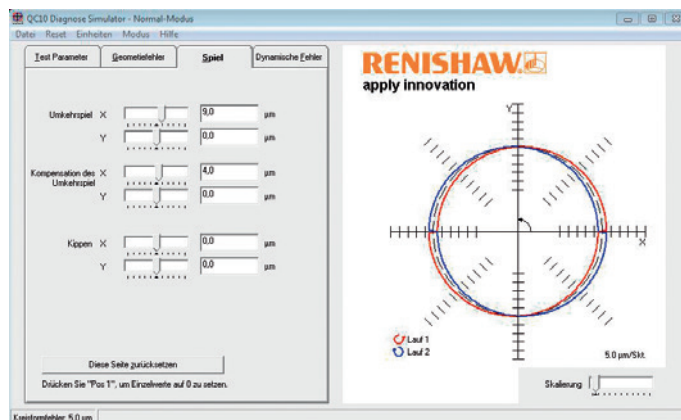
Während der Inbetriebnahme muss der Maschinenhersteller diese mechanischen Umkehrlose messen, indem er pro NC-Achse einen Punkt jeweils aus zwei Richtungen anfährt. Der so ermittelte Positionsunterschied muss in die Maschinenparameter der verwendeten CNC eingetragen werden. Während des Betriebs der Werkzeugma-

schine werden diese Kompensationswerte automatisch aktiviert und der Losekompensationswert als Lageistwert bei jeder Richtungsänderung der Achse auf die betreffende Achse aufgeschaltet.

### Spindelsteigungskompensation (Bild 1.37)

Das Messprinzip der „indirekten Messung“ (der Positionsgeber befindet sich im Servomotor der Antriebsachse oder am freien Ende der Kugelumlaufspindel) bei CNC-Maschinen geht davon aus, dass an jeder beliebigen Stelle innerhalb des Verfahrbereichs die Steigung der Kugelrollspindel konstant ist, sodass die Istposition der Achse

Bild 1.36: Mit Hilfe eines Kreisformtests kann das Umkehrspiel in der X-Achse gemessen werden und über die Losekompensation wird dieser Fehler in der CNC kompensiert.



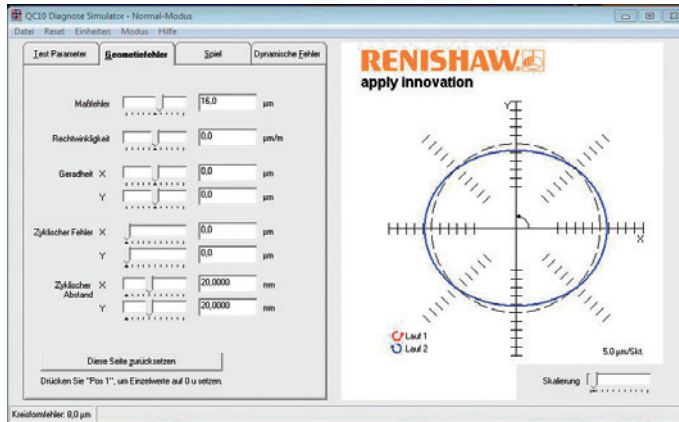
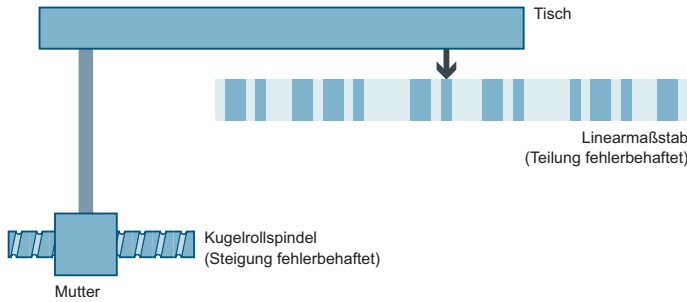


Bild 1.37: Der Maßversatz in der X- und Y-Achse durch die fertigungsbedingten Toleranzen der Kugellrollspindeln führt zu Interpolationsfehlern der Achsen. Er kann durch den Renishaw-Kreisformtest gemessen und mit Hilfe der Spindelsteigungskompensation in der CNC korrigiert werden.

von der Position der Antriebsspindel abgeleitet werden kann. Durch die Fertigungstoleranzen bei Kugellrollspindeln kommt es jedoch je nach Genauigkeitsklasse zu mehr oder weniger großen Maßabweichungen, den sog. **Spindelsteigungsfehlern**.

Hierzu addieren sich u. U. noch die vom verwendeten Messsystem sowie dessen Anbringung an die Maschine bedingten Maßabweichungen, die sog. **Messsystemfehler**.

Um diese zu korrigieren, wird die „natürliche Fehlerkurve“ der CNC-Maschine mittels einem separatem Messsystem gemessen (Laservermessung), die erforderlichen Korrekturwerte in der CNC gespeichert und während des Betriebes ein positionsabhängiger Korrekturwert auf den Lage-Istwert aufgeschaltet.

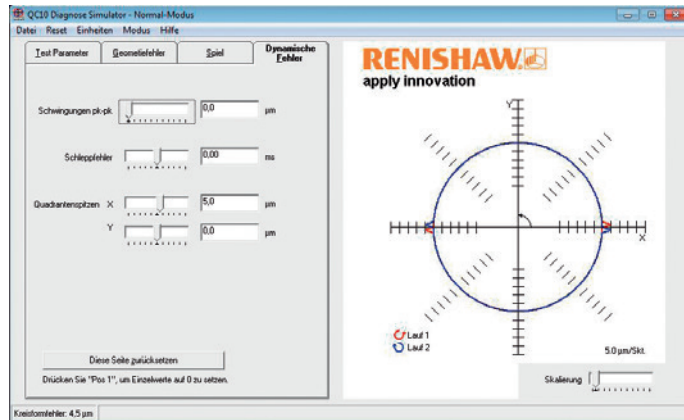
**Reibkompensation oder Quadrantenfehler-Kompensation (Bild 1.38)**

Neben der Massenträgheit und den Bearbeitungskräften haben die Reibungskräfte in den Getrieben und Führungsbahnen der Maschine Auswirkungen auf das Verhalten der Maschinenachsen. Die Konturgenauigkeit einer Achse wird insbesondere beim Beschleunigen aus dem Stillstand durch den Übergang von der Haft- zur Gleitreibung negativ beeinflusst.

Durch die dabei auftretende sprunghafte Änderung der Reibkraft, ergibt sich kurzzeitig ein **erhöhter Schleppfehler**. Bei interpolierenden Achsen (Bahnachsen) führt dies zu signifikanten Konturfehlern. Bei Kreisen ergeben sich die Konturfehler aufgrund des Stillstands einer der beteiligten Achse im Moment der Richtungsumkehr, insbesondere an den Quadrantenübergängen.



Bild 1.38: Quadrantenfehler durch Beschleunigen in der Richtungsumkehr der X-Achse, gemessen mit einem Renishaw-Kreisformtest, kann durch die Reibkompensation korrigiert werden.



Die **Reib- bzw. Quadrantenfehlerkompensation** wird daher beim Beschleunigen der Achse aus dem Stillstand, d.h. im Übergang von Haft- zu Gleitreibung, ein zusätzlicher Drehzahl-Sollwertimpuls als Kompensationswert aufgeschaltet. Dadurch lassen sich Konturfehler an den Quadrantenübergängen von Kreiskonturen fast vollständig vermeiden.

Während der Inbetriebnahme der Werkzeugmaschine muss der Maschinenhersteller die Ausgangsgüte der Kreiskontur an den Quadrantenübergängen mit Hilfe des **Kreisformtests** ermitteln. Dazu kann entweder ein CNC-internes Tool oder ein externes Messgerät (z.B. Renishaw-Kreisformtest QC10) verwendet werden. Die ermittelten Abweichungen müssen als Kompensationswerte in die Korrekturwerttabelle (Maschinendaten) der CNC eingetragen werden (Bild 1.36 bis 1.40).

### Durchhang- und Winkligkeitsfehlerkompensation

Durch den Gewichtseinfluss der mechanischen Komponenten einer Werkzeugmaschine kann es zu einer stellungsabhängigen Verlagerung und Neigung der bewegten Teile kommen, da sich Maschinenteile einschließlich der Führungen durchbiegen. Dadurch kann es zum sogenannten **Durchhangfehler** kommen.

Falls Bewegungsachsen nicht genau im gewünschten Winkel (z.B. senkrecht) zueinander stehen, führt dies mit zunehmender Auslenkung aus der Null-Lage zu wachsenden Positionierfehlern. Dieser **Winkligkeitsfehler** kann durch das Eigengewicht der Maschinenkomponenten, aber auch durch Werkzeuge oder Werkstücke entstehen.

Die Korrekturwerte werden bei der Inbetriebnahme messtechnisch ermittelt und positionsbezogen in der CNC, z.B. als Kompensationstabelle, hinterlegt. Im Betrieb der Werkzeugmaschine wird die entsprechende Achse zwischen den Stützpunkten der Tabellenwerte linear interpolierend durch Aufschalten von Lagesollwerten kor-

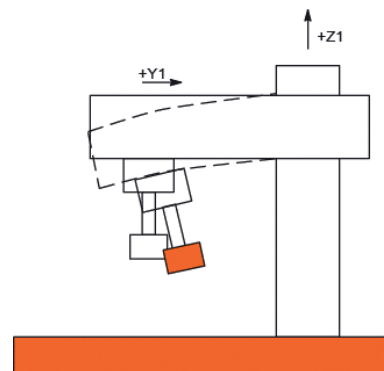


Bild 1.39: Durchhang in negative Y-Richtung durch das Eigengewicht der Auslegerachse.

# 4

## SPS – Speicherprogrammierbare Steuerungen

Die Bedeutung Speicherprogrammierbarer Steuerungen hat stetig zugenommen. Sie ersetzen nicht nur die früher verwendeten Relaissteuerungen, sondern übernehmen auch viele zusätzliche Steuerungsfunktionen, Überwachungs- und Diagnoseaufgaben. Von besonderer Bedeutung ist die heutige CNC-integrierte SPS mit Datenschnittstellen. Durch die flexiblen Möglichkeiten die abgespeicherten Steuerungsaufgaben in der Software zu ändern und zu erweitern, ist die SPS für die elektrische Ausrüstung und Automatisierung von Maschinen vom bedeutenden Vorteil.

### 4.1 Definition

Unter Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) versteht man Steuerungen mit rechnerähnlicher Struktur für den Einsatz in industrieller Umgebung. Mit der SPS werden Aufgaben und Funktionen, wie **Ablaufsteuerungen, logische Verknüpfungen, Zeit- und Zählerfunktionen, arithmetische Operationen, Tabellenverwaltung und Datenmanipulationen, Datenaustausch** zwischen weiteren Steuerungen (SPS) oder z. B. IT-Systemen per standardisierte oder proprietären Kommunikationsprotokollen realisiert. Sie sind, je nach Leistungsgröße, unterschiedlich, aber stets mit einer vom Aufbau her „neutralen“ Verdrahtung. Wie Computer bestehen sie aus einer Zentraleinheit (Mikroprozessor), Programmspeicher (RAM, EPROM oder FEPRM), Ein-/Ausgangsmodule und Schnittstellen für den Signal- und Datenaustausch mit anderen Systemen.

Die **Programmierung** der Steuerungslogik erfolgt mittels Rechner (PC) und einer systemspezifischen Programmiersoftware.

Die Eingabe erfolgt wahlweise als **Kontakplan, Anweisungsliste, Funktionsplan**, mittels grafisch unterstützter Sprachen oder mittels höherer Programmier-

sprachen, z. B. als „Strukturierter Text“. Alle verwenden die grafische Unterstützung bei Programmierung und Simulation der erzeugten Schaltfunktionen.

Für kostengünstige CNCs werden die **Bewegungssteuerung der NC-Achsen und die SPS-Funktionen zusammengefasst** (integrierte Software-SPS) und von einem gemeinsamen Prozessor gesteuert. Die früher bevorzugte Methode, bei höheren Anforderungen an Schnelligkeit oder Funktionsumfang die Aufgaben auf Prozessor und Coprozessor zu verteilen, ist bei heutigen Steuerungen nicht mehr sinnvoll. Die Bestrebungen zur Vereinheitlichung und internationalen Normung der SPS-Programmiersprachen sind in der IEC 1131 dokumentiert (in Europa IEC 61131).

### 4.2 Entstehungsgeschichte der SPS

1970 wurde auf der Werkzeugmaschinenmesse in Chicago erstmals eine neuartige elektronische Steuerung vorgestellt, die sofort großes Interesse fand. Während die Maschinen bis dahin durch aufwändig verdrahtete Relais, Schaltschütze oder elektronische Funktionsbausteine gesteuert wur-

den, war die neue Steuerung aus der Computertechnik entwickelt worden und hatte völlig neue Eigenschaften. Die wesentliche war, dass die Festlegung der Steuerungslogik nicht mehr „fest verdrahtet“, sondern computermäßig „frei programmiert“ wurde. Dazu verwendete man ein computerähnliches Programmiergerät und eine speziell dafür entwickelte Programmiersprache. Das Steuerungsprogramm verblieb während der Inbetriebnahmezeit in schnell änderbaren RAM Speicherbausteinen und nach abgeschlossener Testphase wurde es unverlierbar auf EPROM-Speicher übertragen. Notwendige spätere Korrekturen konnten ohne aufwändige Verdrahtungsänderungen auf die gleiche Art und Weise vorgenommen werden. Die daraus resultierenden Vorteile bezüglich Steuerungsvolumen, Inbetriebnahmezeit und Änderungsfreundlichkeit waren so interessant, dass dem raschen Erfolg lediglich die hohen Preise entgegenstanden. Die Ähnlichkeit zu den damals ebenfalls noch recht neuen Numerischen Steuerungen war unverkennbar. Die ständig gestiegenen Anforderungen bezüglich Automatisierung waren steuerungstechnisch derart aufwändig und kompliziert, dass man diese „Programmierbaren Logic-Steuerungen“ (PLC) insbesondere in Verbindung mit komplexen NC-Maschinen sehr schnell zum Einsatz brachte. So kamen innerhalb weniger Jahre viele neue SPS-Produkte auf den Markt, die zum Teil für spezielle Anwendungen ausgelegt waren. Leider hat man die von der NC-Technik vorliegenden positiven Erfahrungen einer rechtzeitigen Normung nicht genutzt, was dazu führte, dass die Programmierung der einzelnen SPS-Fabrikate bis heute uneinheitlich ist. Dadurch sind die erstellten Programme SPS-spezifisch und nicht auf anderen SPS-Fabrikaten lauffähig. Das bereits bewährte Prinzip der objektbezogenen, „neutralen“ NC-Programmierung und nachfolgenden steuerungsspezifischen Anpassung über Postprozessor wurde bei SPS nie realisiert. Die

Hersteller haben sich mehr darum bemüht, die neuartige Programmierung auf die Kenntnisse und Wünsche der Mitarbeiter in den Elektroabteilungen auszulegen, einer universellen SPS-Programmierung wurde keine Priorität zugeordnet. Rückblickend haben diese „Sprachverwirrung“ und die hohen Preise der Programmiergeräte die schnellere Markteinführung verhindert. Die Norm IEC 1131 ist ein erster Schritt in Richtung einer universellen SPS-Programmierung.

### 4.3 Aufbau und Wirkungsweise der SPS und SPS-Module

Den prinzipiellen SPS-Aufbau zeigen die *Bilder 4.1 und 4.2*. Danach bestehen SPS aus den Funktionsbaugruppen Netzgerät, Zentraleinheit, Programmspeicher, meistens mehreren Modulen für Ein-/Ausgänge und verschiedenen Zusatzfunktionen, wie z. B. Merker, Zeitgeber, Zähler oder Achsmodule, sowie einem Baugruppenträger zur Aufnahme dieser Module. Für den Anschluss des Programmiergerätes und als Datenschnittstelle zur Peripherie dient ein entsprechendes Schnittstellen- oder Koppelmodul, heute vorwiegend als Ethernet-Schnittstelle ausgelegt. Zur Ansteuerung der Aktoren und Sensoren sind entweder direkte E/A-Module oder eine geeignete Feldbus- oder Netzwerk-Schnittstelle vorgesehen. Alle SPS-Hardware-Module werden beim Einstecken in den Baugruppenträger mit der Stromversorgung und dem internen Systembus verbunden. Die Datenübertragung zwischen den einzelnen Baugruppen wird von der Zentraleinheit (CPU) organisiert und überwacht.

Bei **CNC-gekoppelten SPS** hat sich infolge der Weiterentwicklung der elektronischen Bausteine der hardwaremäßige Aufbau stark verändert. Die einzeln steckbaren Baugruppen zur Daten-E/A und -Verarbeitung, sowie Zeit- und Zählfunktionen werden von der Zentraleinheit übernommen. Dadurch entstanden hochintegrierte „Ein-



# 5

## Mechanische Auslegung der Hauptspindel anhand der Prozessparameter

*Dipl.-Ing. (FH) Michael Häußinger,  
Dipl.-Ing. (FH) Hans-Christian Steinbach,  
WEISS Spindeltechnologie GmbH,  
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Müller*

Abhängig von der Anwendung bzw. vom Einsatz der Spindel ist deren Auslegung vorzunehmen. Die jeweiligen veränderlichen Spindelparameter werden durch die Prozessgrößen Schnittgeschwindigkeit und Zerspankraft definiert. Liegt der Fokus der Bearbeitung beispielsweise auf Scherzerspannung mit hohen Schnittkräften und damit einhergehend geringen Schnittgeschwindigkeiten, dann muss die Auslegung der Hauptspindel anders erfolgen als bei einem Spindel­design für Hochgeschwindigkeitsbearbeitungen.

### 5.1 Motorenauswahl

Die Motorauswahl hat tragenden Einfluss auf die korrekte Funktionalität der Hauptspindel. Bei modernen Hauptspindeln ist der **Antriebsmotor integriert**. Der Läufer ist Bestandteil der Spindelwelle und wird von deren Lagerung getragen. Die mechanische Kopplung zwischen Motorwelle und Spindelwelle kann entfallen. Durch den **Wegfall zusätzlicher Übertragungselemente** ergeben sich für den Anwender diverse Vorteile wie **ruhiger Lauf, geringerer Platzbedarf innerhalb der Werkzeugmaschine, höhere Genauigkeiten oder verbesserte Regeldynamik durch weniger Massenträgheit**. Die Übertragung des Drehmoments erfolgt berührungslos. Mechanischer Verschleiß ist ausgeschlossen. Die elektrische Leistung wird nur dem feststehenden Außenmantel des Motors zugeführt. Der Rotor benötigt keine eigenständige Leistungsversorgung.

Generell sind für den Einsatz in einer Motorspindel **synchrone oder asynchrone Einbaumotoren** vorgesehen und stehen in **verschiedenen Drehzahlklassen** zur Verfügung. Beide Varianten stellen bestimmte Anforderungen an die Leistungsumrichter, die bei der Auslegung der Werkzeugmaschine berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich müssen unterschiedliche Vor- und Nachteile, abhängig vom gewünschten Einsatz, gegeneinander abgewogen werden.

**Asynchronmaschinen** sind weniger komplex in der Ansteuerung und bieten einen großen Feldschwäcbereich zur Realisierung höchster Drehzahlen bei gleichzeitig geringerem Strombedarf als vergleichbare Synchronmaschinen. Kurze Hochlaufzeiten können ebenfalls realisiert werden.

**Synchrone Einbaumotoren** bieten hohe Leistungsdichten durch die Permanent­erregung und ermöglichen kompakte Bauweisen bzw. lassen vergleichsweise große

Wellendurchmesser zu. Die Verlustleistung im unteren Drehzahlbereich ist gering. Bei schnelldrehenden Motoren besteht unter Umständen die Notwendigkeit des Einsatzes einer zusätzlichen Induktivität (Drossel). Dies ist im Aufbau des Motors begründet. Zusätzlich besteht mit Drosseln die Möglichkeit, durch Filterung hochfrequenter Signalanteile die Spannungsspitzen zu reduzieren und die Motorwicklungen zu entlasten.

**Motorspindeln** sind allgemein mit integrierten Kanälen zur **Flüssigkeitskühlung des Stators** ausgestattet. Der Stator, der die elektrische Antriebsleistung aufnimmt, ist die hauptsächliche Verlustwärmequelle der Spindeleinheit. Das Kühlkanalsystem ist deshalb thermisch eng an diesen gekoppelt. Allerdings werden auch die thermisch weiter entfernt liegenden Verlustwärmequellen durch das integrierte Kühlsystem versorgt und finden noch eine angemessen effiziente Wärmeabsenkung. Die Spindeleinheit selbst ist über eine **Vor- und Rücklaufleitung** mit dem Kühlmedium zu versorgen. Die Abkühlung des Kühlmediums auf die ursprüngliche Vorlauftemperatur erfolgt außerhalb der Spindel durch ein externes Kühl- oder Wärmetauschsystem. Den notwendigen Druck des Kühlmediums in der Vorlaufleitung liefert eine externe Pumpe. Beide Systeme liegen in der Zuständigkeit des Maschinenherstellers.

Zur **Überwachung der Motortemperatur** werden Temperatursensoren verwendet. Diese dienen dem Schutz vor Überlastung im drehenden Betrieb. Bei speziellen Einsatzbedingungen der Synchronmotoren (z. B. Belastung im Motorstillstand) ist eine **zusätzliche Überwachung** der Motorphasen zum Schutz vor Überlastung erforderlich. Diese wird über einen PTC-(Positive Temperature Coefficient)Kaltleiterdrilling realisiert. Optional stehen auch NTC-(Negative Temperature Coefficient)Heißeleiter zur Verfügung. Diese kommen zum Einsatz, wenn der verwendete Umrichter die Auswertung der KTY-Sensoren nicht erlaubt.

## 5.2 Lagerung

Die Lagerung einer Hauptspindel hat die Aufgabe, diese hochgenau zu führen und die Bearbeitungskräfte aufzunehmen. Abhängig von den geforderten Prozessparametern variieren die Lagerauswahl und deren Anordnung. Den Großteil der eingesetzten Lager stellen Wälzlager dar.

Für Spindeln in Werkzeugmaschinen werden bei **Wälzlagern** fast ausschließlich erhöhte Genauigkeitsklassen verwendet. Hauptsächlich die Bauarten Schrägkugellager, Radial-Schrägkugellager, Spindelager (mit Druckwinkel 15 und 25°), zweiseitig wirkende Axial-Schrägkugellager, Radial- und Axial-Zylinderrollenlager sowie gelegentlich Kegelrollenlager. Je nach den geforderten Leistungsdaten einer Werkzeugmaschine wird die Lagerung mit Kugel- oder Rollenlagern nach den Kriterien Steifigkeit, Reibungsverhalten, Genauigkeit, Drehzahleignung, Schmierung und Abdichtung konstruiert und ausgelegt. Abhängig vom Drehzahlbereich kommen bei Wälzlagern unterschiedliche Materialien wie Stahl und Keramik zum Einsatz. Bei extremen Anforderungen an Laufgenauigkeit und Dämpfung werden darüber hinaus hydrodynamisch oder hydrostatisch gelagerte Spindeleinheiten eingesetzt. Aus einer Vielzahl möglicher Werkzeugmaschinenlagerungen haben sich einige charakteristische Lageranordnungen herausgebildet, die sich im Werkzeugmaschinenbau bewährt haben.

Stehen **hohe Zerspankräfte und geringe Drehzahlen** im Vordergrund, müssen die Lager eine hohe Steifigkeit vorweisen und die Spindel radial und axial genau führen. Durch große Wellen- und Lagerdurchmesser wird dies erreicht. Eine starre Lageranstellung mit entsprechend eingestellter Vorspannung erzeugt die gewünschte Genauigkeit. Bei Anforderungen an sehr hohe Drehzahlen hingegen muss die Lagerung besonders den thermischen und dynamischen Betriebsbedingungen

gerecht werden. Besonders geeignet sind **Hybrid-Spindellager mit Keramikku-geln**. Die Lagerpaare sind antriebs- und abtriebsseitig über Federn mit definierter Vorspannung gegeneinander angestellt. Dies ermöglicht eine zwanglose Kompensation der axialen Längsdehnung durch thermische und dynamische Einflüsse. Optionale Kugelbüchsen unterstützen die radiale Steifigkeit zusätzlich. Bei vorschriftsmäßigem Betrieb der Spindelkühlung, Einhaltung der zulässigen Lagerbelastung und Berücksichtigung der maximal erlaubten Umgebungstemperatur im Betriebszustand ist gewährleistet, dass die zulässige Lager-temperatur nicht überschritten wird.

### 5.3 Schmierung

Um während des Einsatzes der Spindel im Bearbeitungsvorgang eine ausreichende Gebrauchsdauer sowie einen verschleißfreien Lauf sicherzustellen, ist ein Schmierfilm im Reibkontakt unabdingbar. Damit dies gewährleistet werden kann, ist ein Schmierstoff mit den notwendigen Eigenschaften auszuwählen, sowie dessen Anwesenheit zu jeder Zeit des Betriebs sicherzustellen. Generell kann zwischen Fettschmierung und Öl-Luft-Schmierung unterschieden werden. Die **Fettschmie-rung** wird vorzugsweise bei geringeren Drehzahlanforderungen eingesetzt. Ihre Vorteile liegen in der geringen Reibung, der vereinfachten Spindelkonstruktion und den vergleichsweise niedrigen Systemkosten. Bei Einhaltung der jeweiligen Belastbarkeitsgrenzen einer Spindel bestimmt die Fettgebrauchsdauer die Lebensdauer der Lager. Die Fettgebrauchsdauer ist als die Zeit definiert, in der die Lagerfunktion durch den eingebrachten Schmierstoff aufrechterhalten wird. Die Fettgebrauchsdauer ist nicht von der Lagerbelastung abhängig, sinkt allerdings mit zunehmender Drehzahl. Maßgeblicher Einfluss auf die Fettgebrauchsdauer geht von der Fettmenge, der Fettart, des Lagerdesigns, so-

wie Drehzahl, Temperatur und den Einbau-bedingungen aus.

Die zweite Schmierungsart ist die **Öl-Luft-Schmierung**. Zur Schmierung von Spindellagern reicht sehr wenig Öl aus. Es genügen bereits Mengen in der Größenordnung von ca. 100 mm<sup>3</sup>/h (ein Tropfen hat ca. 30 mm<sup>3</sup>), wenn sichergestellt ist, dass alle Roll- und Gleitflächen vom Öl benetzt werden. Eine solche **Minimalmengen-schmierung** ergibt geringe Reibungsverluste. Ölminimalmengen-Schmierung wird angewandt, wenn die Spindeldrehzahl für Fettschmierung zu hoch ist. Das Standardverfahren ist heute die Öl-Luft-Schmierung. Bewährt haben sich Öle nach der Bezeichnung ISO VG 68 + EP, das heißt: Nennviskosität 68 mm<sup>2</sup>/s bei 40 °C und Extrem-Pressure-Zusätze. Hierbei sind vorzugsweise durchsichtige Schläuche mit Innendurchmesser 2 – 4 mm zu verwenden, um den Schmierstofftransport überwachen zu können. Die feine Tröpfchenbildung entsteht durch die überströmende Luft bei 1 – 5 bar und ist ab Schlauchlängen ab 400 mm gewährleistet. Spezifische Strömungsverhältnisse in der Lagerung können die Ölmenge deutlich beeinflussen.

### 5.4 Bearbeitungsprozesse

#### Fräsen

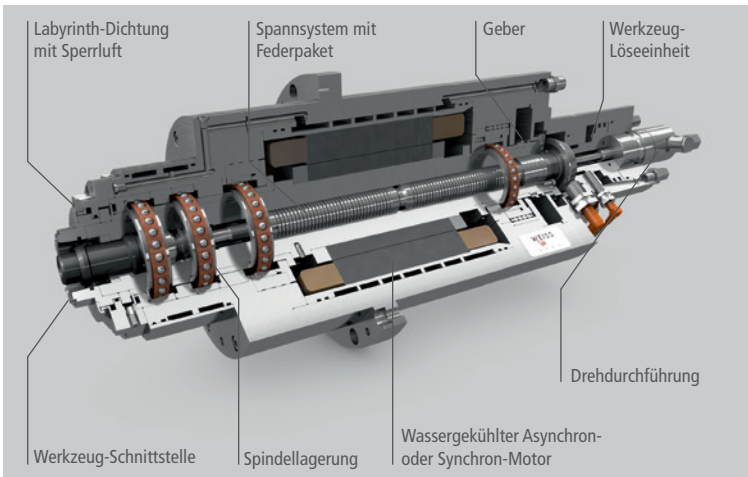
Charakteristisch für Frässpindeln (*Bild 5.1*) ist der Einsatz standardisierter **Werkzeugaufnahmen**. Standardisierung setzt Anpassung an die Bedürfnisse voraus. Sie bietet den Herstellern von Werkzeugmaschinen bzw. Spindeleinheiten die Möglichkeit, durch den einfachen Austausch der Zange mit Halter unterschiedliche Steilkegelwerkzeuge (Kegel-/Anzugsbolzen-Norm) oder Hohlschaftkegelwerkzeuge zu spannen. Verschiedene Ausführungen von Werkzeugspannern mit oder ohne Kühlschmiermittelzuführung, mit hydraulischen oder pneumatischen Löseeinheiten können in die gleichen Werkzeugspindeln einge-

baut werden. Drehdurchführungen und Löseeinheiten sind untereinander kompatibel und austauschbar.

Grundsätzlich wird zwischen **Steilkegelaufnahmen (SK, BT) und Hohl-schaftkegel-(HSK-)Werkzeugaufnahmen** unterschieden. Beide haben typenspezifische Eigenschaften mit Vor- und Nachteilen. Bei Werkzeugsystemen für Spindeln bis 10 000 rpm werden oft Steilkegelwerk-

zeuge nach DIN 69871 Teil 1 eingesetzt (auf Anfrage bei den entsprechenden Zulieferern sind auch höhere Drehzahlen möglich).

5-Achs-Spindeleinheiten werden ebenso unterstützt wie Überkopfbearbeitungen. Sicheres Zerspanen ist in jedem Winkel möglich. Nachteilig ist die begrenzte Drehzahlleistung. Bei hohen Drehzahlen weitet sich die Spindel durch die Zentrifugalkraft



bit.ly/3bTsFOx  
Video 13



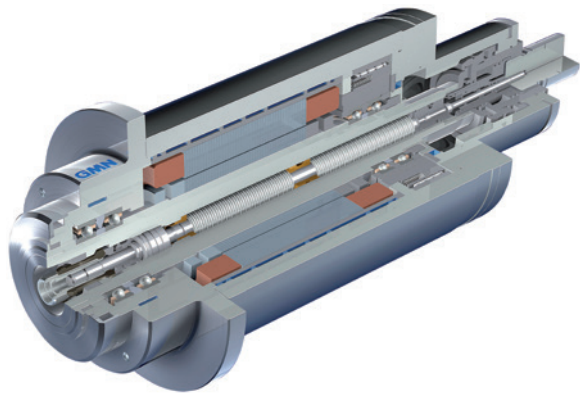
bit.ly/2xSal6t  
Video 14

*Bild 5.1a: Aufbau einer Frässpindel. (Quelle: Weiss, Schweinfurt)*

*Bild 5.1b: Werkzeugspindel für den automatischen Werkzeugwechsel. (Quelle: GMN Nürnberg)*

*Im Lehrfilm werden gezeigt:*

- Flüssigkeitskühlung von Lagerung und Motor
- Kühlmittelzufuhr an den Fräser durch Welle und Gehäuse
- Automatischer WZ-Wechsel und Zugstangen-Überwachung
- Kegelreinigung der WZ-Aufnahme mittels Luft
- Öl-/Luft-Schmierung der vorderen und hinteren Lager
- Sensor zur Messung der Axialen Wellenverlagerung
- Sperrluft gegen Eindringen von Schmutzpartikeln von außen
- Drehwinkelgeber zur Positionierung der Spindel
- Temperaturmessung am vorderen Lager zum Ausgleich der Axialen Wellenbewegung







[bit.ly/3e2OG1w](https://bit.ly/3e2OG1w)

Video 20



*Bild 2.15: Maschine für digital additive Fertigung für die industrielle Produktion von hochwertigen Metallteilen. Der nebenstehende QR-Code verlinkt auf ein Video, das den Druckprozess zeigt.*

#### Nachteile des Lasersinterns

- Schwund und Verzug bei großen Bauteilen durch den thermischen Bauprozess
- Poröse Oberfläche
- Alterung durch UV-Einwirkung

### 2.5.3 3D-Drucken (Binder Jetting)

(Bild 2.16 bis 2.17)

#### Verfahrensbeschreibung

Das 3D-Drucken (3DP, 3D Printing) ist ein generatives Verfahren, bei welchem gezielt flüssiger Binder mit Hilfe eines Druckkopfes oder einer Düse in ein Pulverbett eingebracht wird. Durch wiederholtes Absenken der Bauplattform und anschließendes Auftragen einer dünnen Pulverschicht entsteht dabei schichtweise ein Bauteil. Durch die entsprechende Wahl der Pulver-Binder-Kombination ist eine breite Werkstoffvielfalt, von Kunststoffen über Keramiken und Sand (für Gussformen) bis hin zu Metallen verarbeitbar. Durch die Verwendung eines im Vergleich zum Lasersystem kostengünstigen Druckkopfes entstehen erhebliche Kostenvorteile gegenüber dem Lasersintern. Für Kunststoffbauteile werden die Modelle nach dem Bau durch Infiltration (beispielsweise mit Epoxydharz oder Wachs) nachbehandelt, um die mechanischen Eigenschaften zu erhöhen. Bei der

Verarbeitung von Metallpulver wird das Material durch eine Bindersubstanz verbunden und zu einem Grünling verfestigt, welcher anschließend analog zum IMLS wärmebehandelt und mit Bronze infiltriert wird. Durch die Wärmebehandlung kommt es zu einer Schrumpfung was zu beachten ist, da mit Aufmaß gedruckt werden muss. Das Aufmaß kann aber rechnerisch genau bestimmt werden.

#### Vorteile des 3D-Druckens

- Hohe Baugeschwindigkeit
- Viele Werkstoffe verarbeitbar
- Große Bauräume möglich
- Beträchtliche Anzahl an Anlagenherstellern
- Farbige Bauteile herstellbar
- Preisgünstiges Verfahren

#### Nachteile des 3D-Druckens

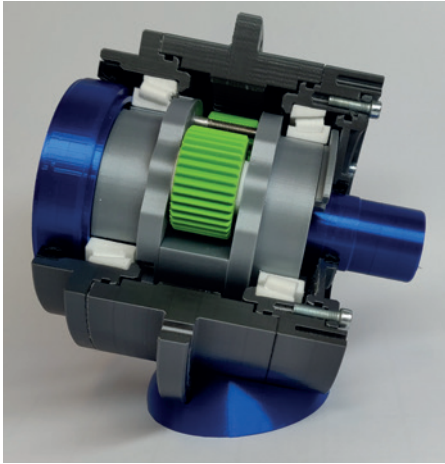
- Mittelmäßige mechanische Eigenschaften wegen geringer Dichte
- Volumenverlust

### 2.5.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

(Bilder 2.18, 2.19)

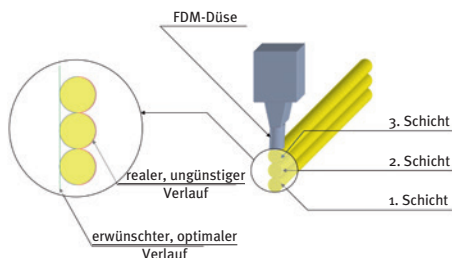
#### Verfahrensbeschreibung

Die Extrusionsverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass eine oder mehrere Dü-

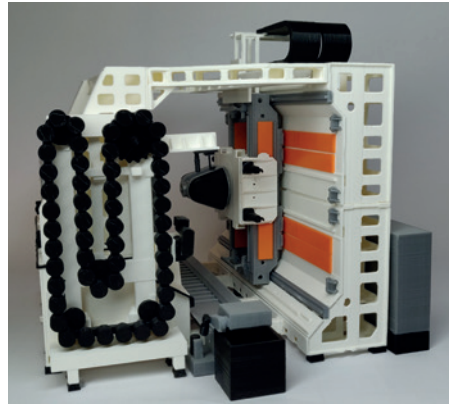


**Bild 2.16:** Voll funktionsfähiges Getriebe-  
modell, im Schnitt dargestellt mit QR-Code  
zum Getriebe in Bewegung.  
(Quelle: Roschiwal+Partner)

sen flüssiges oder aufgeweichtes Material auf eine Bauplattform aufbringen. Durch das anschließende Erkalten erhält das Bauteil seine Festigkeit. Das Fused Deposition Modeling (FDM), auch als Fused Layer Modeling (FLM) bekannt, ist dabei das relevanteste, mit nur einem Werkstoff arbeitende Verfahren. Eine Untergruppe stellt dabei das Multi-, beziehungsweise Poly-Jet-Modeling dar, bei dem Bauteile mit gradierten Eigenschaften hergestellt werden können. Die Düse besitzt dabei im Normalfall zwei Freiheitsgrade (in x- und y-Richtung), während die gesamte Bauplattform in z-Richtung verfahren werden kann. Auf diese Weise werden dreidimensional Bau-



**Bild 2.18:** Bauteilqualität mittels FDM.



**Bild 2.17:** Maschinenmodell mit beweglichen  
Baugruppen M.: 1 : 50. (Quelle: Hüller)

teile erstellt. Der Stoffschluss zwischen den Extrusionsraupen ergibt sich beim Erkaltprozess (Bild 2.18).

### Vorteile des Fused Deposition Modeling

Gute mechanische Eigenschaften

- Geringe Anlagengröße
- Möglichkeit zu Bürosystemen
- ABS ist zu verarbeiten
- Durch Mehr-Düsen-Systeme ist eine leichte Umsetzbarkeit von Multimaterial-Bauteilen möglich
- Hohe Anzahl an Anlagenhersteller
- Selbstbau-Systeme verfügbar



**Bild 2.19:** Verschiedene Bauteile – erstellt mit FDM.



bit.ly/3bYCbSO  
Video 21

# 3

## Maschinenintegrierte Werkstückmessung und Prozessregelung

*Dr.-Ing. Jan Linnenbürger, Renishaw GmbH*

Zur sicheren Produktion von Gutteilen müssen die systematischen Anteile der prozessbedingten Schwankungen von Maschinengeometrie, Rohteilposition und Bearbeitungsergebnis durch geeignete Korrekturmaßnahmen steuerungseitig kompensiert werden. Hierzu sind charakteristische geometrische Größen hauptzeitnah messtechnisch zu erfassen. Der Einsatz von schaltenden und messenden Sensoren in der CNC-Werkzeugmaschine kann diese Aufgabe, bei gleichzeitig größtmöglicher Flexibilität, zuverlässig erfüllen.

### 3.1 Einführung

Bei vielen Ansätzen zur Fertigungsoptimierung wird hauptsächlich versucht, Haupt- und Nebenzeiten durch die Bearbeitungsprozessauslegung so kurz wie irgend möglich zu gestalten. Besser ist es jedoch, möglichst viele Gutteile mit dem geringsten Aufwand zu fertigen. Hierfür muss der negative Einfluss von umgebungs- und prozessbedingten Schwankungen eliminiert werden. Dazu gehören beispielsweise temperaturbedingte Geometrieänderungen von Werkstück oder Maschine, Werkstückposition im Arbeitsraum, Abweichung des Werkzeugs von der Sollgeometrie, Materialinhomogenität usw. Bei dem aktuellen Entwicklungsstand der Werkzeugmaschinen und Steuerungen kann eine weitere Verbesserung des Bearbeitungsergebnisses durch Verringerung der einzelnen Fehlerquellen allerdings nur noch mit erheblichem konstruktivem oder organisatorischem Zusatzaufwand erreicht werden. Die messtechnische Erfassung und steuerungseitige Kompensation der geometrischen Schwankungen von Maschine, Werkzeug und Werkstück ermöglichen weitere Genauigkeitsverbesserungen bei gleichzei-

tiger Erhöhung der Fertigungszuverlässigkeit. Wegen dieser Rückführung des Bearbeitungsergebnisses spricht man von einer **Prozessregelung**. So können z. B. mit dem Einsatz eines Messtasters in der Maschinenspindel die geometrischen Abweichungen zwischen Spindel und Werkstück (oder Werkstückaufspannung) im Koordinatensystem der Maschine erfasst und für sofortige Korrekturen durch die CNC zur Verfügung gestellt werden.

### 3.2 Ansatzpunkte für die Prozessregelung

Jede zusätzliche Operation, wie z. B. die Nacharbeit des Werkstücks erhöht die Produktionskosten. Deshalb sollte immer versucht werden Geometrieabweichungen zu erfassen und deren systematischen Anteil im Rahmen der geforderten Fertigungstoleranzen zu korrigieren. Beispiele dafür sind:

- Nachregeln der Maschinengeometrie (Tracking) durch Erfassung temperaturbedingter Geometrieabweichungen oder der positionsabhängigen Restfehler komplexer Maschinenkinematiken.
- Erfassung von Werkstückposition und

-orientierung, Setzen der Nullpunkte für das NC-Programm.

- Aufmaßerfassung und automatische Anpassung des NC-Programms über Parameter.
- Erfassung der Werkzeugabdrängung, nach Vorbearbeitung mit Schlichtparametern, und Kompensation durch Anpassung von Werkzeugparametern.

Im Sinne des erfolgreichen Produktionsergebnisses ist es also das Ziel, dass, möglichst ohne Entnahme des Werkstücks, die tatsächliche Geometrie von Maschine oder Werkstück messtechnisch erfasst wird. In diesem Zusammenhang ist zu klären, wie genau diese Messungen sein müssen und ob dies auch zuverlässig erreichbar ist. Da es vorrangig um die direkte Verwendung der Ergebnisse zur Anpassung von Programm- oder Maschinenparametern geht, **braucht die Messgenauigkeit nur so groß zu sein, wie das kleinstmögliche Korrekturinkrement, das noch am Werkstück als Geometrieänderung erzielt werden kann.**

Eine typische Vorgehensweise in Übereinstimmung mit diesem Grundsatz ist zum Beispiel: Wenn bei der Bearbeitung von 5 Werkstücken in einer Aufspannung nach der Prüfung des ersten Teils eine Parameterkorrektur erforderlich war, so wird auch das zweite Teil gemessen, um die Wirksamkeit der Korrektur zu prüfen. Ist diese dann innerhalb der erwarteten Prozessschwankung um den Zielwert, können die restlichen Werkstücke fertig bearbeitet werden. Nur das letzte Teil wird dann noch geprüft und damit bestätigt, dass die gesamte Serie mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit den geforderten Qualitätskriterien entspricht.

Zur Absicherung der Prozessregelung sollte, entsprechend den Qualitätsanforderungen der Serienfertigung, die tatsächliche Geometrie einer Auswahl an Werkstücken durch Referenzmessung, beispielsweise mit einem Koordinatenmessgerät

(KMG) außerhalb der Maschine überprüft werden. Dabei geht es dann um die Verifikation des geregelten Fertigungsprozesses selbst und nicht des einzelnen Teils. Nur so können unzulässig große nicht kompensierbare geometrische Schwankungen der Werkstückgeometrie erkannt werden. Dieser Schritt hat nicht das Ziel, eine Qualitätssicherung im Sinne einer Werkstückabnahme durchzuführen, sondern zu kontrollieren, **ob die Fertigungsgenauigkeit erfolgreich an die Wiederholgenauigkeit von Maschine und Bearbeitungsprozess angenähert worden ist.** Hierdurch wird eine gleichbleibend hohe Qualität des gefertigten Werkstücks nahe am Maximum der Fertigungseinrichtung gesichert.

### 3.3 Einsatzbereiche von Werkstück- und Werkzeugmesssystemen

Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des Messsystems und die Integration in Maschine und Steuerung ist der Zeitpunkt innerhalb des Bearbeitungsablaufs, an dem das System eingesetzt werden soll. In der Praxis haben sich **vier Phasen** etabliert:

- Pre-Prozess Messung,
- in-Prozess Messung,
- prozessnahe Messung und
- post-Prozess Messung.

Am häufigsten wird in der Praxis eine **Pre-Prozess Messung** zur Prüfung und Korrektur der Maschinengeometrie oder Erfassung der tatsächlichen Position des Werkstücks angewendet. So ist z. B. die genaue geometrische Parametrierung der Rundachsen in der kinematischen Kette einer mehrachsigen Maschine eine wesentliche Voraussetzung für eine hohe Qualität der Bearbeitung. In Abhängigkeit von der geforderten Fertigungsgenauigkeit ist zu empfehlen die tatsächliche Position der beteiligten Maschinenachsen vor der Werkstückbearbeitung mit Hilfe von Werkstück-

messtastern und entsprechenden CNC-Messprogrammen zu prüfen und vorhandene Abweichungen von der Sollposition gegebenenfalls zu kompensieren (Bild 3.1). Hierzu werden steuerungsseitige Mess- und Einstellzyklen oder Korrekturparameter im NC-Programm verwendet (Bild 3.2).

Vor Ausführung eines NC-Programms muss sich das Werkstück genau an der programmierten Position befinden. Hierfür muss durch entsprechend wiederholgenaue Werkstückaufnahmen oder, flexibler und zuverlässiger, der tatsächliche Werk-

stücknullpunkt relativ zum programmierten Nullpunkt messtechnisch erfasst und in der Steuerung abgespeichert werden (z. B. als Nullpunktverschiebung, siehe Kapitel „Nullpunkte“). Mit Hilfe von Spindelmesstastern kann dies sowohl im Einrichtung als auch Automatikbetrieb mit hoher Genauigkeit erfolgen (Bild 3.3 und Bild 3.4).

Die tatsächlichen **Werkzeugdaten wie Länge, Durchmesser und Schneidengeometrie**, müssen der Steuerung vor Beginn der Bearbeitung bekannt sein. Neben einer externen Erfassung mit Werkzeugvoren-

Bild 3.1: Messaufbau zur Bestimmung der Drehachsgeometrie mittels Referenzkugel und Messtaster.

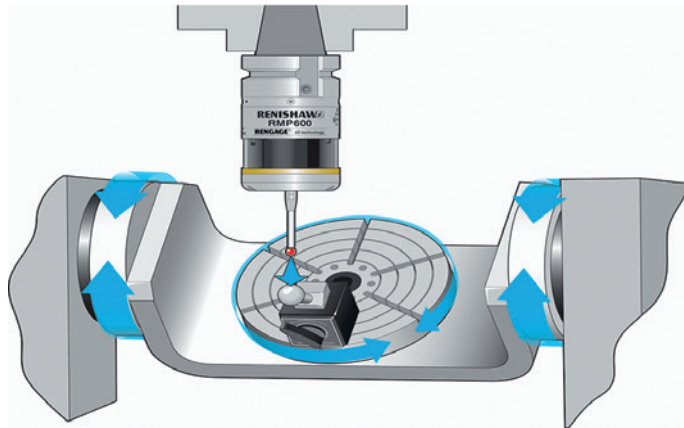
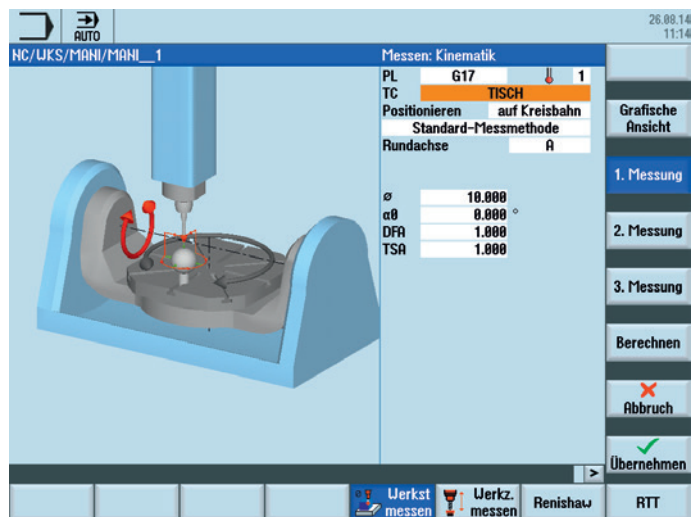


Bild 3.2: Steuerungsspezifischer Messzyklus zur Erfassung der Rundachsgeometrie (Beispiel CYCLE996), CNC Sinumerik 840D sl.





  
 bit.ly/2RfbwZH  
 Video 28

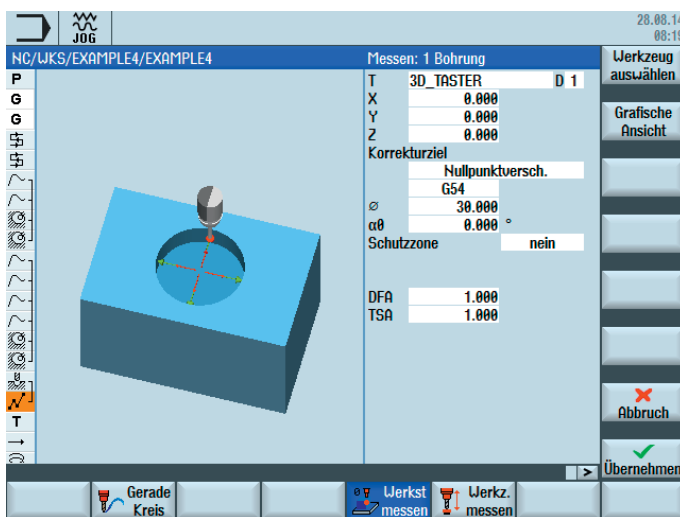
*Bild 3.3: Durch Vierpunktmessung einer Bohrung wird der Werkstücknullpunkt in die Mitte des Rohteils gelegt.*

stellgeräten können diese Daten auch direkt in der Maschine bestimmt werden. Dafür gibt es taktile oder berührungslose Werkzeugmesssysteme im Arbeitsraum

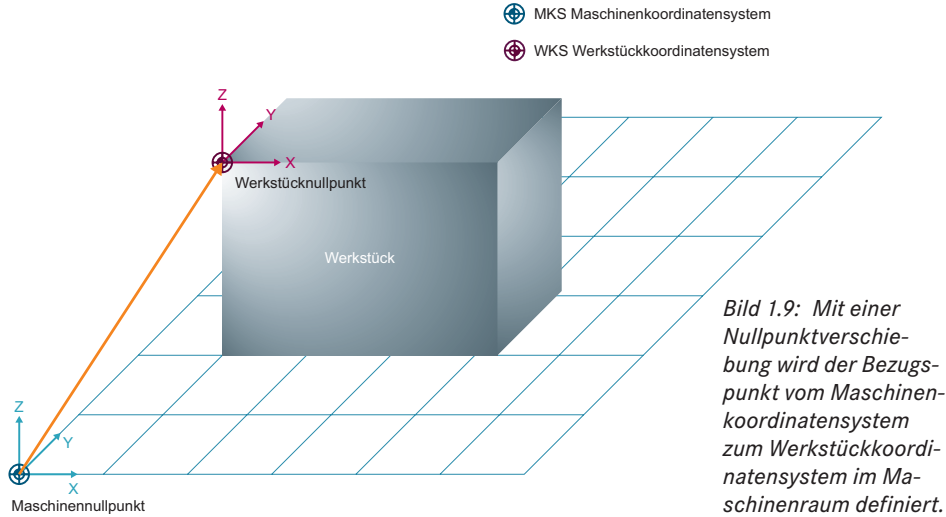
der Maschine (Bild 3.5). Steuerungsspezifische Zyklen unterstützen den Messvorgang sowohl im Einrichte- als auch Automatikbetrieb (Bild 3.6).

Eine echte **In-Prozess Messung**, durch hauptzeitparallele Erfassung der Werkstückgeometrie mittels fest eingebauter werkstückspezifischen Sensoren, ist besonders von Schleifmaschinen bekannt. Hier wird die Zustellung der Schleifscheibe direkt in Abhängigkeit vom Messwert am Werkstück geregelt. Bei anderen Bearbeitungsverfahren behindern oftmals Vibrationen, z.B. durch den unterbrochenen Schnitt beim Fräsen, und ungünstige Umgebungsbedingungen den Einsatz hochgenauer Messtechnik.

Durch eine **prozessnahe Messung** zwischen den einzelnen Bearbeitungsoperationen können die qualitätsrelevanten Schwankungen erfasst und bereits im nächsten Bearbeitungsschritt korrigierend berücksichtigt werden. Automatisch in die Werkzeugspindel einwechselbare schaltende oder messende Messtaster erreichen die erforderlichen Genauigkeiten bei gleichzeitig hoher Flexibilität für den Einsatz in variantenreichen Fertigungen. Die Anpassung an das Werkstück und die Bearbei-



*Bild 3.4: Beispiel eines steuerungsspezifischen Zyklus für das Messen einer Bohrung im Automatikbetrieb, Abweichungen können als Korrektur automatisch entweder in der Werkzeugtabelle (Fräsradius) oder in der Nullpunktverschiebung eingetragen werden, CNC Sinumerik 840D sl.*



*Bild 1.9: Mit einer Nullpunktverschiebung wird der Bezugspunkt vom Maschinenekoordinatensystem zum Werkstückkoordinatensystem im Maschinenraum definiert.*

Sind die Achsen der Maschine mit einem Absolutwertmesssystem ausgestattet, ist kein Referenzieren der Achsen erforderlich, die CNC erkennt sofort nach dem Einschalten die korrekte Achsposition.

### **Werkstücknullpunkt, Programmnullpunkt (Bild 1.8)**

Beim Erstellen eines NC-Programms ist die Programmierung, also die Umsetzung der einzelnen Arbeitsschritte in die NC-Sprache, meist nur ein kleiner Teil der Arbeitsvorbereitung.

Vor der eigentlichen Programmierung sollte die **Planung und Vorbereitung der Arbeitsschritte** im Vordergrund stehen. In Bezug auf die Werkstückzeichnung und der zur Verfügung stehenden Werkzeugmaschine muss immer zuerst der Werkstücknullpunkt passend festgelegt werden.

Der **Werkstücknullpunkt W** ist der Ursprung des Werkstückkoordinatensystems. Er kann vom Bediener/Programmierer frei gewählt werden und wird bestenfalls so gewählt, dass sich alle Maße der Zeichnung auf diesen Punkt beziehen bzw. leicht

errechnen lassen. Wichtig ist weiterhin, dass sich dieser Werkstücknullpunkt nach dem Aufspannen des Werkstückes auf der Maschine rasch anfahren und aufnehmen lässt. Bei Drehmaschinen legt man z. B. den Werkstücknullpunkt oft auf dem Schnittpunkt der Rotationsachse mit der Bezugskante der Längenvermessung. Bei Fräswerkstückchen wird der Werkstücknullpunkt oft auf eine Ecke oder auch genau in die Mitte des Werkstückes gelegt. Die Achsbezeichnung und Achsrichtung wird mit der des Maschinen-Koordinatensystems übereinstimmend gewählt und richtet sich nach der verwendeten Maschine.

Auf den **Maschinennullpunkt** bezogene Koordinaten-Werte sind jedoch zur Programmierung ungeeignet, da sie bei mehrachsigen Maschinen die Lage des Werkstückes zum Maschinennullpunkt nicht berücksichtigen und sich das programmierte Werkstück nicht auf eine andere Maschine oder Aufspannung übertragen lässt.

Anschließend werden die Achsen auf das Werkstückkoordinatensystem genullt, d. h. der Nullpunkt wurde vom Maschinennullpunkt zum Werkstücknullpunkt verschoben. Der Werkstücknullpunkt muss

vom Bediener mittels Ankratzen oder An-tasten ermittelt werden.

Beim **Ankratzen** wird mit Hilfe eines bereits vermessenen und datentechnisch in die CNC eingepflegten Werkzeuges der Nullpunkt am definierten Werkstücknullpunkt durch das Abheben eines möglichst minimalen Spans ermittelt. Ebenfalls manuell kann durch den Einsatz eines **Kantentaster** (Fräsen) oder der **Messuhr** diese Position bestimmt werden. Dazu muss mit möglichst geringer Geschwindigkeit im Tipp-Betrieb oder mit dem Handrad an die gewünschte Position gefahren werden. Die so ermittelten Werte müssen dann in die CNC übernommen werden.

Genauer ist die Ermittlung des Nullpunktes mit Hilfe von **automatischen Messtastern**. Allerdings muss dazu die Hardware und Software auf der CNC-Maschine installiert sein und es sind die zusätzlichen Kosten dafür zu beachten. Viele CNC-Steuerungen unterstützen den Einsatz von schaltenden Messtastern durch entsprechende Messzyklen bzw. die Hersteller der Messtaster bieten Softwarepakete für den Einsatz ihrer Messtaster in Verbindung mit den diversen Steuerungstypen an. Der Werkstücknullpunkt kann entweder in der

Basis-Verschiebung oder mit einer flexiblen Nullpunktverschiebung eingetragen werden. Ob die Basis-Verschiebung oder die Nullpunktverschiebung verwendet wird, hängt neben der verwendeten CNC-Ausrüstung auch von der Programmierphilosophie der jeweiligen Firma ab. Werden z.B. Nullpunktspannsysteme auf der Maschine verwendet, ist es sinnvoll, die Verschiebung vom Maschinennullpunkt zum Werkstücknullpunkt fest in die Basisverschiebung einzugeben. Vom Bezugspunkt des Spannsystems kann dann über flexible Nullpunktverschiebungen leicht der jeweilige Werkstücknullpunkt definiert werden.

## Nullpunktverschiebung

(Bild 1.10 bis 1.12)

Die Differenz zwischen Maschinennullpunkt und Werkstücknullpunkt kann flexibel in eine Nullpunktverschiebung eingetragen werden. Mit der Parametrierung und Aktivierung der Nullpunktverschiebung geschieht automatisch die Anpassung des Koordinatensystems an die Werkstückkoordinaten. Die Verwendung von Nullpunktverschiebungen macht die Nutzung einer CNC-Werkzeugmaschine kom-



bit.ly/2W37hmZ

Video 33

	X	Y	Z	A	C
Istwert MKS	-200.614	701.306	683.946	0.000	0.000
G54	-100.307	500.653	341.973	0.000	0.000
Gesamt NPV	-100.307	500.653	341.973	0.000	0.000
WJZ:	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Istwert WJS	-100.307	200.653	341.973	0.000	0.000

X	Y	Z
-100.307	500.653	341.973
-100.307	500.653	341.973

Bild 1.10: Eintrag einer Nullpunktverschiebung G54 in die CNC. (Beispiel Sinumerik 840D sl, Quelle: Siemens AG)



fortabel. Die eigentliche Programmerstellung des NC-Programmes kann ohne Rücksicht auf die Maschinenkoordinaten der Maschine erfolgen. Mit der Nullpunktverschiebung wird der Werkstücknullpunkt passend zur Maschine transformiert.

Um eine Nullpunktverschiebung durchführen zu können, bietet die CNC-Steuerung Speicherplätze an. Hier können die Verschiebungswerte für jede Achse gespeichert werden. Wird die Bearbeitung gestartet und wurde die Verschiebung entsprechend am Anfang des Programms eingetragen, werden diese von der CNC-Steuerung verwendet und bei der Berechnung der Koordinatenwerte berücksichtigt. Das bedeutet in der Abarbeitung, dass sich alle nachfolgenden Koordinatenwerte um die Verschiebungswerte der Nullpunktverschiebung vergrößern.

Dafür stellen CNC-Steuerungen heute bis zu 99 Nullpunktverschiebungen zur Verfügung.

Die Nullpunktverschiebungen können z.B. über die G-Funktionen G54 ... G57 aufgerufen werden (Tab. 1.4).

Welche G-Funktion für die Nullpunktverschiebung genommen wird, bleibt dem Programmierer überlassen.

Die Möglichkeit der Nullpunktverschiebung erleichtert dem Programmierer die Arbeit, besonders dann, wenn der Programmnullpunkt auch programmierbar um beliebige Werte in jede Achse verschoben werden kann. So lassen sich z.B. gleichbleibende Bohrbilder an beliebige Stellen transferieren und die einmal berechneten Koordinatenwerte bleiben erhalten. Bei Werkzeugmaschinen mit Palettenwechsel, Spannwürfeln oder Spanntürmen verwendet man die Nullpunktverschiebungen in Verbindung mit einem manuell änderbaren Korrekturwert, um Aufspannungskoordinaten festzulegen. Besonders in der Einzel- oder Kleinserienfertigung lassen sich mit dem Einsatz mehrerer Nullpunktverschiebungen Rüstzeiten verringern. So kann man beispielsweise für jedes vorhandene Spannmittel einmalig einen separaten Anschlagpunkt festlegen und in die Nullpunktverschiebungstabelle der CNC eintragen, oder auch für verschiedene

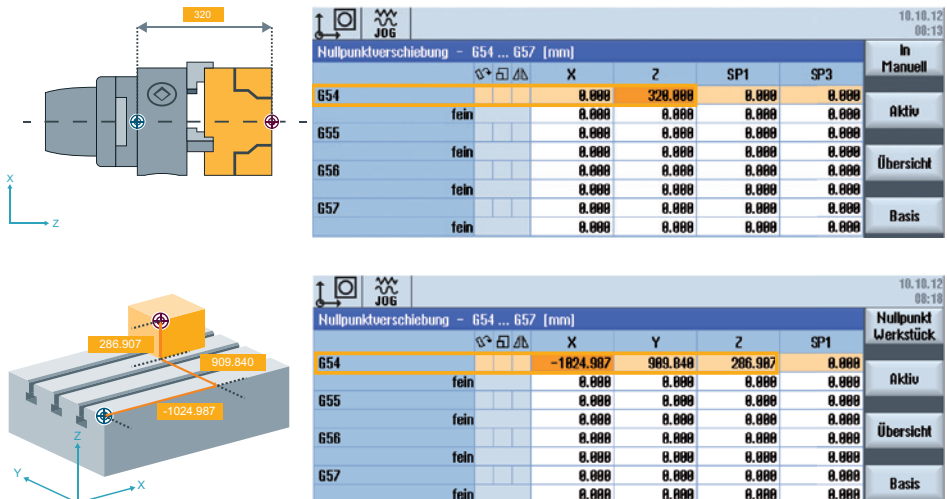


Bild 1.11: Eintrag einer Nullpunktverschiebung in die CNC am Beispiel einer Dreh- und einer Fräsmaschine (Beispiel Sinumerik 840D sl, Quelle: Siemens AG).

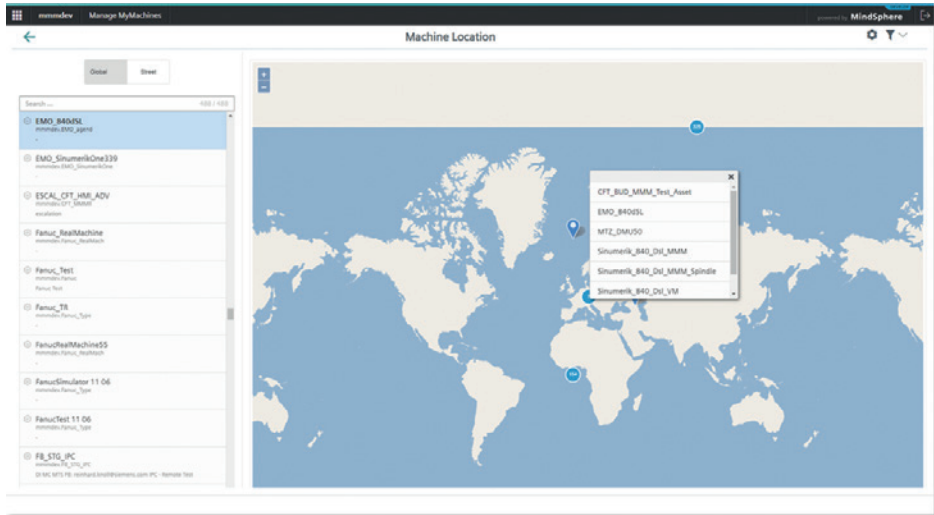


Bild 5.13: Cloud-basiertes System MindSphere bietet eine Übersicht der Maschinen weltweit. (Quelle: Siemens AG)

vorbereitung zusammen. Der Startpunkt zur Integration der Digitalisierung ist also immer in der Arbeitsvorbereitung zu suchen.

### 5.3 Der Digitale Zwilling einer Werkzeugmaschine

Im Lebenszyklus von Werkzeugmaschinen gibt es zwei ganz verschiedene Anwendungen für Digitale Zwillinge: eines ist von den Anforderungen des Maschinenherstellers geprägt und betrifft die Anwendung bei Konstruktion, Bau und Inbetriebsetzung sowie Wartung und Service von Maschinen.

Die zweite Anwendung betrifft den Betrieb der Werkzeugmaschine, vor allem das Erstellen und Verifizierenprozesssicherer CNC-Programme für die zerspanende Fertigung.

beider Welten lassen sich Konfigurationen weit vor der realen Umsetzung testen, optimieren und auftretende Probleme analysieren und beseitigen (Bild 5.14).

Eine Werkzeugmaschine ist ein komplexes mechatronisches Gebilde. Deshalb ist auch ihr Digitaler Zwilling komplex. Genau wie das reale Objekt „Werkzeugmaschine“ umfasst der digitale Zwilling (Bild 5.15):

- das virtuelle Abbild der CNC-Ausrüstung
- das virtuelle Abbild des Maschinenverhaltens
- das virtuelle Abbild der Mechanik

Digitale Zwillinge unterstützen alle Phasen des Lebenszyklus einer Maschine. Das reicht von Entwicklung, Bau und Inbetriebnahme der Maschine über ihre Nutzung zur Fertigung ganz unterschiedlicher Werkstücke bis hin zu Service und Wartung: All dies kann mit einem Digitalen Zwilling auf der virtuellen Ebene begleitet, geplant, geprüft und optimiert werden. Je nach Lebensphase der Maschine (Entwicklung, Nutzung, Service) sind die Anforderungen an den Digitalen Zwilling sehr verschieden.



bit.ly/2UMZdGi

Video 39

Generell ist ein Digitaler Zwilling ein virtuelles Modell eines Prozesses, eines Produkts oder einer Dienstleistung, welches die reale und virtuelle Welt miteinander verbindet. Durch die Verknüpfung

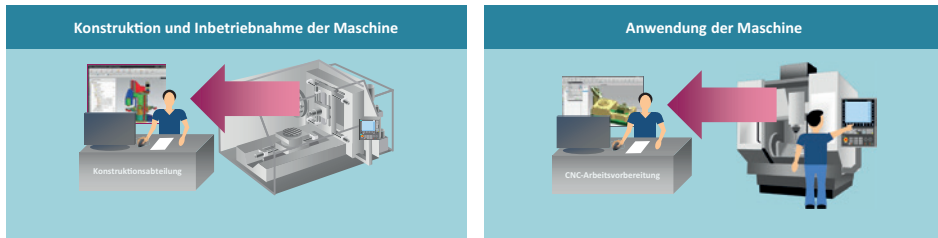


Bild 5.14: Digitale Zwillinge der Werkzeugmaschine unterstützen sowohl den Prozess der Konstruktion und Inbetriebnahme als auch der Anwendung.

Der **Betreiber** einer Maschine will mit Hilfe des Digitalen Zwillings seiner Werkzeugmaschine(n) schon auf virtueller Ebene sicherstellen, dass **CNC-Programme fehlerfrei** sind und auf Anhieb das gewünschte Bearbeitungsergebnis liefern. Die Zeit für das Einrichten des CNC-Programms kann deutlich reduziert werden. Das Programm kann fast vollständig, ohne unproduktive Zeit auf der realen Maschine virtuell getestet werden. Es kann sichergestellt werden, ob Werkzeuge, Spannmittel und die Technologiewerte den Anforderungen des jeweiligen Werkstücks und den Möglichkeiten der Zielmaschine tatsächlich entsprechen. In der Fertigung soll der Digitale Zwilling dafür sorgen, dass die Maschine prozesssicher läuft und von Prozessschritten entlastet wird, die keine Späne produzieren. Dass die Maschine generell so funktioniert wie diese spezifiziert

ist, das wird dabei vorausgesetzt und nicht mehr per Digitalem Zwilling überprüft.

**Elektrokonstruktion, Softwareabteilung und Service des Maschinenherstellers** dagegen nutzen den Digitalen Zwilling zur **Unterstützung des Inbetriebnahme-prozesses** der Maschine. Hier geht es darum, das Zusammenspiel von CNC-Applikation mit Aktoren, Sensoren und Mechanik in Betrieb zu nehmen, zu testen und zu optimieren. Dabei werden alle denkbaren Betriebssituationen im Voraus durchgespielt und die auftretenden Sonderfälle in der CNC-Applikation berücksichtigt. Nach Abnahme und Lieferung der realen Maschine nutzt der Service diesen Digitalen Zwilling, um Störungen nachzuvollziehen und Lösungen anzubieten, ohne zum Kunden reisen zu müssen.

Beim Maschinenhersteller stehen also die Verkürzung von Entwicklungs- und



Bild 5.15: Der Digitale Zwilling verbindet die virtuellen Abbildungen der Elektronik, Sensorik und Mechanik einer Werkzeugmaschine.

# Stichwortverzeichnis

## A

Abrasiv-Schneiden 345  
Abrichten von Schleifscheiben 310  
Abrichtgerät 310  
Abrichtwerkzeuge 310, 320  
Abrichtzyklen 312  
ABS-Kupplung 483, 486  
absolute Messung 80  
Absolutmaße 566  
Absolutmaßprogrammierung 567  
abstandscodierte Referenzmarken 80  
Achsantriebe 464  
Achshezeichnung 67  
Achsen, asynchrone 119  
Achsen sperren 119  
Achsen, synchrone 122  
Achsen tauschen 123  
Achsmechanik 218  
Achseelung 446  
Achseichtung, positive 69  
Adaptive Control (AC) 142  
Adaptive Controls 754  
Adaptive Feed Control 144  
Adaptives Bearbeiten 636  
Adaptive Vorschubregelung 142  
Additive Fertigungsverfahren 367  
Additive Manufacturing 709  
AGV (Automated Guided Vehicles) 413  
Analoge Regelung 219  
angetriebene Werkzeuge 483  
angetriebene Werkzeugspindeln 347  
Ankratzen 585  
Anpassprogramm 117  
Anpassteil 49  
Antriebe, analog/digital 246  
Antriebsleistung 265  
Antriebsregelung 217  
Antriebsregler 235  
Antriebstechnik 221

Anzeigen in CNC 163  
Apps 170  
Äquidistantenkorrektur 593  
Arbeiten von der Stange 110  
Arbeitsereichternde Grafiken 623  
Arbeitsfeldbegrenzung 123  
Asynchrone Unterprogramme 124  
Asynchronmotor 240, 254, 256  
Aufspannplanung 642  
Ausbildung und Schulung 659  
Auslegerbohrmaschinen 322  
Ausspindelwerkzeuge 486  
Auswahl des geeigneten Programmiersystems 625  
Automated Guided Vehicles (AGV) 415  
Automatische Systemdiagnosen 124  
Automatisierung 51, 68  
- flexible 456  
- gleitende 449  
AWL - Anweisungsliste 195

## B

Bahnsteuerung 44, 290  
Balance Cutting 125  
Bandsägen 325  
BDE/MDE 118  
Bearbeitungsstrategien 635  
Bearbeitungszentrum 104, 209, 285  
- mehrspindliges 294  
Bedienung 55, 324  
Bedienungspersonal 340  
Betriebssystem 43, 117  
Bezugspunkte 571  
Big Data 162, 726  
Binder jetting 390  
Blindleistung 467  
Blindstrom 467  
Blindstromanteil 465

Blockzykluszeit 125, 152, 297  
 Bohr-Gewindefräsvorfahren 492  
 Bohrmaschinen 208, 322  
 Bohrstangen mit Feindreheinsätzen 488  
 Bohrwerk 323  
 Bohrzentren 323  
 Bohrzyklen 290, 571  
 Bohrzyklen G80 – G89 571  
 Brennschneiden 330  
 Bridge 693  
 Build-Prozessor 392  
 Bussysteme 458

## C

C-Achsbetrieb 257, 277  
 C-Achse 304  
 CAD 701  
 CAD-CAM Kopplung 370  
 CAD/CAM Programmierung und Fertigung 612  
 CAD/CAM-Systeme 713  
 CAE-Software 704  
 CAI (Computer Assisted Inspection) 362  
 CAM-basierte CNC-Zerspanungsstrategien 614  
 CAM (Computer Aided Manufacturing) 701, 704, 714  
 CAM-orientierte Geometrie-Manipulation 634  
 CAPP (Computer Aided Process Planning) 705  
 CAPTO-Aufnahmen 482  
 CA-Systeme 703  
 CBN 480  
 CFK-Werkstoffe 297  
 CIM 701  
 Closed Loop-Technologie 73  
 Cloud 758  
 CNC 117  
 – Definition 117  
 – für Drehmaschinen 304  
 – für Messmaschinen 361  
 – für Sägemaschinen 325  
 – für Schleifmaschinen 309  
 – Grundfunktionen 117  
 – offene 173  
 – Preisentwicklung 178  
 – Software 117  
 – Sonderfunktionen 123  
 – Werkzeugmaschinen 285

CNC-Bedienoberfläche 164  
 CNC-Hochsprachenprogrammierung 600  
 CNC-Programmierplätze 610  
 CO<sub>2</sub>-Laser 326  
 Computer Aided Engineering 704  
 Computer und NC 50  
 Containermanagement 763  
 Cutter Location Data (CLDATA) 613  
 Cyber-Physical Systems (CPS) 728, 761

## D

D-Regler 225  
 Datenanreicherung 733  
 Datenbus 189  
 Dateneingabe 55  
 Datenkommunikation mit CNC-Steuerungen 669  
 Datenmodelle 633  
 Datenschnittstellen 119  
 Datenumwandlung 150  
 Daten und Schnittstellen 644  
 Diagnosefunktion 248  
 Diagnose-Software 119  
 Dialogführung 305  
 Diamant 480  
 Diamantrollenabrichtgerät 311  
 Differentialregler 223  
 DIGILOG-Messtaster 548  
 Digitale Fertigung 711  
 Digitale intelligente Antriebstechnik 221  
 Digitale Produktentwicklung 707  
 Digitale Regelung 220  
 Digitaler Zwilling 391, 741, 748f.  
 Digitalisierte Fertigung 52  
 Digitalisierung 737, 739  
 Digital Light Processing Chip (DLP-Chip) 383  
 Digital Light Processing (DLP) 384  
 Dimensionierung von Antrieben 261  
 DIN 66025 564  
 DIN 66217 68  
 Diodenlaser 329  
 Direct energy deposition powder by laser 389  
 Direct energy deposition wire by laser 390  
 Direktantriebe 242  
 direktes Messsystem 248  
 Direktes Metall-Lasersintern 376  
 DNC – Direct Numerical Control 667  
 DNC – Distributed Numerical Control 55

DNC-Schnittstelle 126  
 DNC-System 52  
 Doppelgreifer 106  
 Doppelspindel-Bearbeitungszentren 289  
 Drahtelektrode 340  
 Dreh-Fräsen 621  
 Dreh-Fräszentren 347, 481  
 Drehgeber 73, 75  
 Drehmaschinen 298  
 Drehmoment 253, 264  
 Dreh-Schleifzentren 353  
 Drehspindel 277  
 Drehstrom Synchronmotoren 257  
 Dreh-Wälzfräszentren 353  
 Drehzahlen 253  
 Drehzahlregelung 228  
 Drehzahlvorsteuerung 97  
 Drehzahlwechsel 113  
 Drehzentrum 350  
 Drehzyklen 571  
 3D-Bearbeitung 630  
 3D-Drucken (Binder Jetting) 380  
 3D-Messmaschine 360  
 3D-Modelle 636  
 3D-Printing 374  
 3D-Scannen 374  
 3D-Simulation 596  
 3D-Werkzeug-Radiuskorrektur 156  
 3-Finger-Regel 68  
 Dry Run 129  
 Durchhangfehlerkompensation 91  
 DXF 509, 594, 633  
 DXF-Dateien 613  
 DXF-Konverter 594  
 Dynamische Vorsteuerung 88

## E

Ebenen- Auftrag (PBF, MJ, BJ) 391  
 EBM (Electron Beam Melting) 377  
 EB-Schweißen 344  
 Eckenverzögerung 141  
 EDGE-Computing 743  
 Effektivmoment 265  
 Effektor 442  
 Einbaumotoren 271  
 Einfahren neuer Programme 656  
 Einfluss der CNC 207  
 Eingabegrafik 623  
 Einrichtfunktionen 129  
 Einsatz der CNC-Werkzeugmaschinen 56

Einstechschleifprozess 313  
 einstellbare Werkzeuge 486  
 Einzelsatzbetrieb 129  
 Electron Beam Melting (EBM) 377  
 Electronic-Key-System 172  
 Elektronenstrahl-Maschinen 342  
 elektronischer Gewichtsausgleich 88, 98  
 elektronische Schüsselsysteme 171  
 elektronische Werkzeug-Identifikation 518  
 Energiebilanz 464  
 Energieeffizienz 119, 461  
 Energiemanagement 766  
 Energieverbrauch 463  
 Erodiermaschine 340  
 ERP 676, 732  
 ERP-Lösung 517  
 Erzeugungsrad 321  
 Ethernet 246, 674  
 ETHERNET 192  
 Evolvente 314

## F

F-Adresse 113  
 Fabriknetz 404  
 Fahrplanweisungen 562  
 Fahrständerbauweise 287, 289  
 Fahrständermaschine 324  
 Faserlaser 329  
 Feature-Technik 637  
 Feinbearbeitung von Bohrungen 486  
 Feinverstellköpfe 488  
 Feldbus 189  
 Feldschwäcbereich 256  
 FEM-Berechnung 371  
 Ferndiagnose 158  
 Fernzugriff 162  
 Fertigungsflexibilität 427  
 Fertigungsplanung 433  
 Fertigungsprinzipien 408  
 Fertigungssimulation 647  
 Fertigungssystem (FFS) 111  
 FFS-Leitrechner 420  
 Flachbettdrehmaschinen 298  
 Flachsleifmaschine 306  
 flexible Bearbeitungszelle 335  
 flexible Fertigungslinien 402  
 flexible Fertigungssysteme 395  
 flexible Fertigungszellen 111, 398  
 Flurförderzeuge 415  
 Flüssigkeitskühlung 274

Formfräsen 315  
 Formschleifen 315  
 Formverfahren 315  
 FRAME 141  
 Fräs-Dreh-Bearbeitungszentrum 347  
 Fräserradiuskorrektur 593  
 Fräs-Laserzentrum 351  
 Fräsmaschinen 209, 285  
 Frässpindel 481  
 Fräszyklen 571  
 Freiformflächen 630  
 Freischneiden 119  
 Frequenzrichter 226, 230, 253  
 Führungen 210, 306  
 5-Achs-Maschinen 290  
 5-Seiten-Bearbeitung 293  
 Funkenerosionsmaschinen 339  
 Funktionen der NC 117  
 FUP - Funktionsplan 195  
 Fused Deposition Modeling (FDM) 380  
 Fused Layer Modeling (FLM) 381

## G

G54 ... sG57 586  
 Gantry-Achsen 69  
 Gantrybauweise 285  
 Gateway 693  
 generative Fertigungsverfahren 367, 374  
 Geometriedaten 297  
 geometrische Zuverlässigkeit eines  
 Werkzeugs 474  
 Gewindebohren 144  
 Gewindebohren ohne Ausgleichsfutter 144  
 Gewindefräsen 144, 490  
 Gewindeschneiden 305  
 G-Funktionen 567  
 G-Funktionen nach DIN 66025, Bl. 2 568  
 Gleichrichter 227  
 Gleichstrom-Servomotoren 239  
 Gleitführungen 210  
 Greifer 442  
 Greifer-Wechselsysteme 444

## H

Hakenmaschine 212  
 Handeingabe 120  
 Handhabung 439  
 Handshake 695  
 Hardware 42

Hardware-Schnittstellen 694  
 Hartfeinbearbeitung 319  
 Hartfeinbearbeitungsmaschine 314  
 Hart-Zerspanung 297  
 Hauptantriebe 255  
 Hauptsätze 563  
 Hauptspindel 271  
 Hauptspindelantriebe 253, 266  
 High-Performance-Cutting 297  
 High Speed Cutting (HSC) 275, 481  
 Hilfsachsen 148  
 Hilfsgrafik 623  
 HMI (Human Machine Interface) 168  
 Hobelkamm 316  
 Hochgantrybauweise 287  
 Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrum  
 296  
 Hochleistungsbearbeitung 297  
 Hochsprachenelemente 120  
 Hohlschaftkegel 274, 481  
 Honen 319  
 HPC 297  
 HSC 481, 615  
 HSC-Bearbeitung 489  
 HSK-Aufnahmen 482  
 HUB 732  
 Hülschnittverfahren 315  
 Human-Machine-Interface 403  
 hybride Werkzeugmaschine 356  
 Hydraulik 464

## I

IGES 370, 634  
 Inbetriebnahme 248  
 indirektes Messsystem 248  
 Indirektes-Metall-Lasersintern 378  
 Industrial Ethernet 192  
 Industrie 4.0 719, 737, 759  
 Industrieroboter 110, 439 f., 442  
 - Aufbau 440  
 - Einsatzkriterien 456  
 Informationen 683  
 inkrementale Messung 80  
 Innengewindefräsen 490  
 In-Prozess-Messen 146  
 Integrierte Simulations-Systeme 656  
 integrierte Werkzeugkataloge 510  
 Interdisziplinarität 724  
 Internet der Dinge 725, 761  
 Interpolation 147, 253

Interpolator 44  
I-Regler 223

## J

JT-Modell 638

## K

Kalkulation 764  
Kanalstruktur 145  
Kantentaster 585  
Karussell-Drehmaschine 324  
Kassettenmagazine 105  
Kegelräder 320  
Kegelradfräsmaschinen 321  
Kegelradherstellung 314  
Kegelreinigung 274  
Keramik 480  
Kettenmagazin 105  
Kippmoment 256  
Kollisionserkennung, automatische 655  
Kollisionüberwachung, dynamische 130  
Kollisionsvermeidung 127  
Kompensation 88  
– beschleunigungsabhängiger Positions-  
abweichungen 99  
– dynamischer Abweichungen 88, 98  
– von Durchhang- und Winkligkeitsfehlern  
88  
Komplettbearbeitung 351  
Komplettwerkzeuge 476, 510  
Komponenten eines Werkzeug-  
Identifikationssystems 522  
Konsolbettbauweise 286  
Konsolständerbauweise 286, 288 f.  
Koordinatenachsen 68  
Koordinatentransformation 348  
KOP - Kontaktplan 195  
Körperschallaufnehmer 312  
Körperschallmessung 313  
Korrekturwerte 121  
Korrekturwerttabelle 293  
Kosten und Wirtschaftlichkeit von DNC 679  
Kreissägen 325  
Kreisverstärkung 225  
Kreuzbettbauweise 288  
Kreuzgittermessgerät 78  
Kreuztischbauweise 286, 288  
Kugelgewindetriebe 73, 238  
Kühlmittel 213

Kühlmittelzufuhr an den Fräser 274  
Kühlung/Schmierung 474  
Künstliche Intelligenz 723  
Künstliche Intelligenz (KI) 40  
Kurzklemmhalter 487  
K<sub>v</sub>-Faktor 71, 225, 238, 248, 250, 268

## L

Laderoboter 304  
Lageregelkreis 70, 72, 210, 219, 248  
Lageregelung 71  
Lageregler 71  
Lagersysteme 518  
Laminated Object Manufacturing (LOM) 385  
Langdrehmaschinen 299  
Längenmessgeräte 74, 78  
Längenmesssystem 237  
LAN - Local Area Networks 683  
Laserauftragschweißen 385  
laserbasierte Strahlschmelzverfahren 377  
Laserbearbeitungsanlagen 326  
Laserbearbeitungsköpfe 330  
Laserbearbeitungsmaschine 336  
Lasersintern 384  
Lasersintern (LS) 376, 378  
Lattice-Optimierung 372  
Leistungssteile 235, 446  
Lichtleitfaser 330  
Linearantriebe 245  
Linearinterpolation 152  
Linearmagazine 105  
Linearmaßstab 248  
Linearmotoren 84, 242, 244  
Linear- oder Geradeninterpolation 45  
Logbuch 675  
Look-Ahead-Funktion 297  
Losekompensation 88

## M

Makros 121  
Mantelfläche 483  
manuelle Betriebsart 134  
Maschinenauswahl 410  
Maschinendatenerfassung 158  
Maschinendatenerfassung (MDE) 745  
Maschinengestelle 209  
Maschinenmodell 651  
Maschinennullpunkt 584  
Maschinen-Parameterwerte 44



maschinenseitige Aufnahmen 481  
 Maschinenverkleidung 212  
 Masken-Sintern (MS) 384  
 Maßstabfaktor 145  
 Maßstabfehler-Kompensation 146  
 Master-Slave-Verfahren 690  
 Materialanforderung 761  
 Material extrusion 390  
 Materialise E-Stage 384  
 Material jetting 390  
 MDE/BDE 681  
 Mehr-Achsen Auftrag (DED, EXT) 391  
 Mehrfach-Spannbrücke 293  
 Mehrmaschinenbedienung 742  
 Mehrspindelautomaten 299  
 MES (Manufacturing Execution System)  
     732  
 MES Pyramide 406  
 Messen und Prüfen 358  
 Messgeber 248  
 messgesteuertes Schleifen 313  
 Messköpfe 539  
 Messmaschinen 358  
 Messprotokoll 360, 536  
 Messsteuergeräte 313  
 Messsystem, direktes 466  
 Messsystem, indirektes 237  
 Messtaster 147, 358, 361, 529, 585  
 Messuhr 585  
 Messzyklen 146, 358, 535, 585  
 Minimalmengenschmierung 273  
 Mobile Computing 724  
 Mockup 709  
 modulare Werkzeugsysteme 485  
 Montageroboter 443  
 Motor 235, 239  
 Motorgeber 237, 240  
 Motorspindeln 256, 260, 272  
 MT Connect 176  
 Multitasking Bearbeitung 621  
 Multitasking-Bearbeitung 148  
 Multitasking-Maschinen 346  
 Multi-Touch-Bedienung 166

## N

Nachlauffehler 72, 155  
 Nano- und Pico-Interpolation 147  
 NC-Achsen 46  
 NC-Hilfsachsen 148  
 NC-Kern, virtueller 155

NC-Programm 42, 52, 561  
 NC-Programmiersysteme 629  
 NC-Programmierung 51, 607  
 NC-Programm und Programmierung 52  
 NC-Programmverwaltung 675  
 NC-Simulation 654  
 Nd:YAG-Laser 327  
 Nesting 391  
 Netzwerktechnik für DNC 672  
 Nibbel-Prinzip 334  
 Nick und Gear-Kompensation 88  
 Nullpunkte 531, 571, 573  
 Nullpunktverschiebung 541, 585  
 NURBS 149, 297

## O

OEE 752  
 Offene Steuerungen 173  
 Offenheit einer CNC 173  
 Offset 121  
 Öl-/Luft-Schmierung 274  
 OPC UA 176, 189  
 Open System Architecture 174  
 Optimierte CNC-Drehbearbeitung 620  
 Optimierte CNC-Frässtrategien 615  
 Overall Equipment Effectiveness (OEE) 752

## P

Palette 110  
 Palettenpool 111  
 Palettenspeicher 111  
 Paletten-Umlaufsysteme 414  
 Palettenverwaltung 149, 742  
 Palettenwechsel 290  
 Parallel-Achsen 69  
 Parallelkinematik 209  
 Parametrierung 228  
 PDM (Product Data Management/Produkt-  
     datenmanagement) 706, 710  
 PDM-Systeme 704  
 Pick-Up-Drehmaschinen 298  
 Pick-up-Verfahren 110, 314  
 PID-Regler 224  
 Planung eines Flexiblen Fertigungssystems  
     407  
 Planung flexibler Fertigungssysteme 433  
 Planungsphase in der Serienfertigung 659  
 Platzcodierung 108  
 - variable 109, 118

PLM (Product Lifecycle Management) 701, 707  
 PMI (Product Manufacturing Information) 703  
 Pneumatik 464  
 Polarkoordinaten 121  
 Portalfräsmaschinen 287  
 Portalroboter 402  
 Portal-Tischbauweise 287  
 Position setzen 121  
 Positionsregelung 219  
 Postprozessor 53, 294, 643, 648  
 Postprozessoren (PP) 613  
 Postprozessor und Simulation 391  
 Powder bed fusion by electron beam 389  
 Powder bed fusion by laser 389  
 Preisbetrachtung 178  
 Prismen-Aufnahme 483  
 Probelauf 129  
 Product Data Management 706, 710  
 Product Lifecycle Management 707, 711  
 Produktbaukasten 319  
 Produktdatenmanagement 710  
 Produktionsleitsysteme 395  
 Produktionsnetzwerk 404  
 Produktionsplanungssysteme 432  
 Produktionsprozess 659  
 Produkt-Lebenszyklusverwaltung 707  
 Profilieren von Schleifscheiben 312  
 Profilschleifen 319  
 Profilschleifmaschine 311  
 PROFINET 189  
 Programmänderung im laufenden Betrieb 658  
 Programmaufbau, Syntax und Semantik 563  
 Programmgenerierung, automatische 451  
 Programmieren von Drehmaschinen 305  
 Programmieren von Messmaschinen 360  
 Programmieren von Robotern 445, 449  
 Programmieren von Schleifprozessen 311  
 Programmiermethoden 607  
 Programmier-Software 123  
 Programmiersysteme 290, 312, 625  
 Programmierung 52, 290  
 - werkstatorientierte 290, 305  
 Programmierung für die generative Fertigung 614  
 Programmnullpunkt 584  
 Programmtest 121, 129  
 Programmverwaltung 675  
 Proportionalregler 223

Protokoll 691  
 prozessnahe Messung 532  
 Prozessregelung 529  
 Prozesssteuerung 763  
 Prüfschärfensteuerung 766  
 Pulsweiten-Modulation 230  
 Punktsteuerungen 44

## Q

Quadrantenfehler-Kompensation 88, 90

## R

Rahmenständerbauweise 289  
 Rapid Manufacturing 369  
 Rapid Prototyping 368, 709  
 Rapid-Technologien 368  
 Rapid Tooling 369  
 Rattern 98  
 Ratterunterdrückung 98  
 Räumen 315  
 Rechnereinheit 445  
 Referenzpunkt 573  
 Regeldifferenz 250  
 Regelkreis 84  
 Regelung 217  
 Regelungstechnik 217  
 Reglertypen 223  
 Reibkompensation 88, 90  
 Relativmaße 566  
 Reset 121  
 Revolver 104, 301, 483, 587  
 RFID 518  
 Roboter 110  
 Roboterarm 442  
 Robotersteuerung 444  
 Rohrbiegemaschinen 338  
 Rollenförderer 415  
 rotierende Werkzeuge 476, 481  
 Ruckbegrenzung (Slope) 122  
 Rückzugsbolzen 481  
 Rund- oder Schwenkachsen 69

## S

Sachmerkmalleiste 477  
 Safe Handling 447  
 Safe Operation 447  
 Safe Robot Technology 447  
 Sägemaschinen 324

- Satz ausblenden 122
- Satz Vorlauf 122
- Säulenbohrmaschinen 322
- Scannen auf Messmaschinen 361
- Schaeffler 754
- Schälrad 316
- Schaltsbefehle 42
- Schaltsbefehle (M-Funktionen) 564
- Schaltfunktionen 103, 562
- Scheibenlaser 328
- Scheinleistung 467
- Schleifbänder 308
- Schleifen 275
  - unrunder Formen 312
- Schleifmaschinen 209, 305
- Schleifscheiben 308
- Schleifschnecken 320
- Schleifspindeln 276, 347
- Schleifwerkzeuge 308
- Schleifzyklen 312
- Schleppabstand 71
- Schleppfehler 71, 155
- Schleppfehler-Kompensation 97
- Schmelzschnneiden 330
- Schneiderodieren 340
- Schneidplatten 477
- Schneidrad 316
- Schneidstoff 479
- Schnittdaten 474
- Schnittgeschwindigkeit 296, 304, 474
- Schnittstellen 694
- Schnittwerte 511
- Schrägbett Drehmaschinen 298
- Schrägverzahnung 316f.
- Schrittmotoren 239
- Schutzbereiche 129
- Schwenkachsen 294
- Schwenkbarer Drehtisch 293
- Selective Laser Melting 376
- selektive Laserstrahlschmelzen 369
- Selektives Lasersintern (SLS) 378
- Semi Closed Loop 83
- Semi-Closed-Loop-Betrieb 77
- Senkerodieren 340f.
- Sensoren 451
- SERCOS interface 246
- Servoantriebe 464
- Servomotor 235, 237, 239
- Shiften 318
- Sicherheitsfunktionen bei Robotern 447
- Sicherheitskonzepte, integrierte 136
- Sicherheitstechnik 136
- Simulation 122, 128f., 642, 647, 660, 708
  - der Bearbeitung 290
  - des Bearbeitungsablaufs 715
- Simulationsgrafik 623f.
- Simulation von FFS 428
- Simultandrehen 148
- Sinterverfahren 374
- Slice-Prozess 370
- Smart Data 162
- Smarte Objekte 724
- Smart Factory 730, 759
- Software 43
- Software-Schnittstelle 123, 697
- Sonderwerkzeuge 492
- Späneförderer 213
- Spannfutter 276
- Spannmittel 651
- Spannvorrichtungen 411
- speicherprogrammierbare Anpassteuerung 117
- speicherprogrammierbare Steuerung 185
- Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) 185
- Sperrluft 274
- Spiegeln, Drehen, Verschieben 122
- Spindelantriebe 297
- Spindeldrehzahl 113
- Spindelmesstaster 537, 539f.
- Spindelsteigungsfehlerkompensation 88, 249
- Spindelsteigungskompensation 89
- Spline 149, 152
- Spline-Interpolation 149, 152
- Splines 297
- Sprachumschaltung 153
- Sprungantwort 217
- SPS 173, 178, 185, 202
- SPS, PLC 49
- Stangenbearbeitungszentrum 347
- Stanzkopf 335
- Stanz-Laser-Maschine 336
- Stanz- und Nibbelmaschinen 333
- stehende Werkzeuge 476, 482
- Steigungsfehler 74
- Steilkegel 481
- Steilkegelaufnahmen 274
- STEP 370, 633f.
- STEP (ISO/IEC 10303) 152
- Stereolithografie 382
- Sternrevolver 483

Steuerungen, offene 173  
 Steuerungsarten 44  
 Steuerungsnachbildung 648  
 Stirnräder 314  
 Stirnseitenbearbeitung 349  
 STL 370  
 STL-Format 370  
 Strahlführung 330  
 Strahlquellen 326  
 Strahlschmelzen 375, 378  
 Streckensteuerungen 44  
 Struktur der NC-Programme 562  
 Stützensgenerator 384  
 Stützgeometrien 392  
 Sublimierschneiden 330  
 Swiss type Lathe 299  
 Synchron-Linearmotoren 242  
 Synchronmotoren 257f.  
 Synchron-Servoantriebe 239  
 Synchron-Servomotor 231, 239  
 Systemdiagnosen 124

## T

Tapping-Center 323  
 Taster, messender 361  
 Tastkopf 360  
 Tauchfräsen (Plunging) 615  
 TCP/IP 189  
 Technologische Informationen 562  
 Teileprogramme 117  
 Teilverfahren 315  
 Temperaturfehler-Kompensation 118  
 Temperaturkompensation 88, 92  
 Tiefbohrmaschinen 323  
 Token Passing 690  
 Token-Prinzip 690  
 Topologie-Optimierung 371  
 Torquemotoren 84  
 Touchbedientafeln 170  
 Touch-Bedienung 166  
 Touch Panels 166  
 Trägheitsmoment 238  
 Transferstraßen 401  
 Transformation 588  
 Transportsysteme 414  
 trochoidale Bearbeitung 615  
 Trockenbearbeitung 213, 296, 319  
 Trockenlauf 129

## U

Übertragungsgeschwindigkeit 691  
 Übertragung von Daten 182  
 Umkehrspanne 72  
 Umlenkspiegel 330  
 Umschlingungswinkel 615  
 Universal-Rundschleifmaschine 306  
 Universelle NC-Programmiersysteme 612  
 Unterprogramme 122

## V

V.24-Schnittstelle 695  
 VDI-Halter 482  
 Verschleißkompensation 487  
 Verstellkopf 488  
 Vertikaldrehmaschinen 298  
 Vertikalmaschinen 285  
 Verzahnmaschinen 209, 314  
 Verzahnverfahren 315  
 Vierquadrantenbetrieb 228  
 Virtualisierung 724  
 Virtuelle Maschine 650  
 Voll Hartmetall 480  
 Volumenkompensation (VCS) 88, 92  
 Voreinstellgeräte 513  
 Vorschub 474  
 Vorschubantriebe 71, 235, 237, 257, 306  
 Vorschubbegrenzung 155  
 Vorschubgeschwindigkeit 113  
 Vorsteuerung 155, 226

## W

Wälzfräsen 315  
 - von Zahnrädern 316  
 Wälzfräser 316  
 Wälzfräsmaschinen 314, 317f.  
 Wälzführungen 210  
 Wälzhobeln 316  
 Wälz- oder Hülschnittverfahren 315  
 Wälzschleifen 315  
 Wälzstoßen 315f.  
 Wartung 767  
 Wasserstrahl-Schneidmaschinen 344  
 Wechselrichter 227, 236  
 Wegbedingungen 567  
 Weginformationen 67, 562, 566  
 Weichvorbearbeitung 316  
 Weltwirtschaftskrise 2009 30

- Wendeplatten 477, 480
  - Wendeschneidplatten-Feinverstellung 487
  - Wendespanner 293
  - Werkrad 321
  - Werkstatororientierte Programmierung (WOP) 51
  - Werkstatororientierte Programmierung (WOP) 608
  - Werkstückmesstaster 530
  - Werkstückmessung 529
  - Werkstücknullpunkt 584
  - Werkstücktransportsysteme 411
  - Werkstück- und Werkzeugwechsel 314
  - Werkstückwechsel 109, 290
  - Werkstück-Wechseleinrichtung 290
  - Werkzeugaufnahmen 273, 500
  - Werkzeugausgabe 764
  - Werkzeugblatt 506
  - Werkzeugbruch-Kontrolle 305
  - Werkzeugbruch- und Standzeitüberwachung 118
  - Werkzeuge 473, 641, 652
    - angetriebene 108, 119
  - Werkzeugidentifikation 108, 505
  - Werkzeugklassifikation 478, 507
  - Werkzeugkomponenten 508
  - Werkzeugkorrektur 541, 592, 765
  - Werkzeugkorrektur, 3-D 156
  - Werkzeugkorrekturwerte 304
  - Werkzeuglängenkorrektur 592
  - Werkzeuglängenmessung 124
  - Werkzeuglisten 511
  - Werkzeuglogistik 514
  - Werkzeugmaschine 159
  - Werkzeugradiuskorrektur 592
  - Werkzeugrevolver 104, 483
  - Werkzeugschleifmaschine 306, 314
  - Werkzeugspeicher 290
  - Werkzeug-Standzeitüberwachung 305
  - Werkzeugträgerbezugspunkt 587
  - Werkzeugverwaltung (Tool Management) 293, 501
  - Werkzeugvoreinstellung 512
  - Werkzeugwechsel 104, 106, 131
  - Werkzeugwechsellpunkt 587
  - Werkzeugwechsler 464
  - Wiederanfahren an die Kontur 122
  - Winkelkopf 485
  - Winkligkeitsfehlerkompensation 91
  - Wirbelfräsen (Trochoidales Fräsen) 143, 615
  - Wirkleistung 467
  - WLAN - Wireless Local Area Network 673
  - WOP - Werkstatororientierte Programmierung 290, 305
  - Wuchtausgleich, dynamischer 489
- Z**
- Zirkular- oder Kreisinterpolation 46
  - Zustandsüberwachung 158
  - Zustellung 474
  - Zwischenkreis 235
  - Zwischenkreisspannung 256
  - Zyklen 324, 570
  - Zylindermantelflächen 293