



BIBLIOTHEK DES TECHNISCHEN WISSENS

Dietmar Schmid  
Thomas Wissert  
Hans Kaufmann  
Wolf-Immo Jutzler

Peter Demmel  
Thomas Engel  
Eckehard Kalhöfer

Hartmut Hoffmann  
Peter Wippenbeck  
Christof Meier

Andreas Hartmann  
Severin Hannig  
Peter Ernst

# Werkzeugmaschinen

## Aufbau, Konstruktion und Systemverhalten

1. Auflage

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

Europa-Nr.: 50175

**Die Autoren des Buches:****Dietmar, Schmid**, Prof. Dr.-Ing., Essingen:*Einführung, Spanende Werkzeugmaschinen, Industrieroboter und Einzelbeiträge***Peter Demmel**, Dr.-Ing., München: *Werkzeugmaschinen der Urform- und Umformtechnik***Hartmut Hoffmann**, Prof. Dr.-Ing., München: *Werkzeugmaschinen der Urform- und Umformtechnik***Peter Wippenbeck**, Prof. Dipl.-Ing., Aalen: *Werkzeugmaschinen für Polymerverarbeitung***Andreas Hartmann**, Dipl.-Ing. (FH), Stadtbergen: *Maschinen zur Additiven Fertigung***Severin Hannig**, Dr.-Ing., Aachen: *Messungen an Werkzeugmaschinen***Thomas Wissert**, Dipl.-Ing. Stuttgart: *Elektrische Steuerungen und Antriebe***Christof Meier**, Dr.-Ing., Heroldsbach: *Robotersteuerungen***Peter Ernst**, Dr.-Ing., Erlangen: *Querschnittsaufgaben***Hans Kaufmann**, Dipl.-Ing., (FH), Aalen: *Hydraulik und Pneumatik***Wolf-Immo Jutzler**, Prof. Dr.-Ing., Groß-Umstadt: *Abtragende Werkzeugmaschinen***Thomas Engel**, Dr. rer. nat., Aalen: *Koordinatenmessmaschinen***Eckehard Kalhöfer**, Prof. Dr.-Ing., Aalen: *Qualifizierung von NC-Maschinen***Lektorat und Leitung des Arbeitskreises:** Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schmid, Essingen**Bildbearbeitung:** Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

Dem Buch wurden die neuesten Ausgaben der Normen und Gesetze zu Grunde gelegt. Verbindlich sind jedoch nur die Normblätter selbst und die amtlichen Gesetzestexte. Wie in Lehrbüchern üblich werden etwa bestehende Patente, Gebrauchsmuster oder Warenzeichen meist nicht erwähnt. Das Fehlen eines solchen Hinweises bedeutet daher nicht, dass die dargestellten Produkte frei davon sind. Die Bilder sind von den Autoren entworfen und entstammen aus deren Arbeitsumfeld. Soweit Bilder, insbesondere Fotos einem Copyright Dritter unterliegen sind diese mit dem ©-Symbol und dem Urhebername versehen.

1. Auflage 2017

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-5017-5

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

Daten und Darstellungen, die sich auf Herstellerangaben beziehen sind gewissenhaft recherchiert. Sie sind aber mit keiner Gewährleistung irgendwelcher Art verbunden und können sich durch weiteren Fortschritt auch verändert haben. Der Verlag und die Autoren übernehmen daher keine Verantwortung oder Haftung aus der Nutzung von Daten oder Darstellungen dieses Buches.

© 2017 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH &amp; Co. KG., 42781 Haan-Gruiten

<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald, unter Verwendung einer Grafik der INDEX-Werke GmbH & Co. KG Hahn & Tessky, Esslingen

Satz: Sperling Info Design GmbH, 30989 Gehrden

Druck: UAB BALTO print, Vilnius LT-08217, Litauen

## Vorwort

Werkzeugmaschinen sind *maschinelle Werkzeuge*, – im Unterschied zu den Handwerkzeugen.

Werkzeugmaschinen gelten als die wichtigsten Produktionsmittel der industriellen Fertigung. Man benötigt sie zur Herstellung der Betriebsmittel aller Serienprodukte und aller Maschinen. Sie sind die Träger der Industriegesellschaft und somit auch unseres Wohlstandes. Sie gewährleisten die hohe Verfügbarkeit der täglichen Gebrauchsgüter. Es sind die Werkzeugmaschinen, die für eine Massenproduktion Voraussetzung sind und so große Teile der Menschheit von Hunger und Not befreien und andere Kulturgüter, wie z. B. die Medizin und das Verkehrs- und Kommunikationswesen, erst ermöglichen.

Aufgrund der Dominanz der Zerspantechnik innerhalb der industriellen Fertigung ist den spanenden Werkzeugmaschinen der größte Teil des Buches gewidmet. Damit wird deren Schlüsselfunktion in unserer Industriegesellschaft Rechnung getragen. Ausführlich werden auch die wichtigsten konstruktionsbestimmenden Maschinenelemente und Aggregate, wie z. B. Gestelle, Führungen, Lager und Antriebe nebst zugehörigen Regelungstechniken, behandelt.

Den spanenden Werkzeugmaschinen folgen die Maschinen zum Umformen, Zerteilen, Biegen, Druck- und Spritzgießen sowie weitere Maschinen. Hervorzuheben sind hier die Bauweisen und Konstruktionsdetails der abtragenden Maschinen, der Koordinatenmessmaschinen, der Industrieroboter und der AM-Maschinen (3D-Drucker). Über diese Gruppe findet man wohl in der einschlägigen Literatur kaum Beiträge zu deren Besonderheiten hinsichtlich Aufbau, Konstruktion und Steuerungstechnik. Die konzeptionelle Gestaltung der Maschinen und die richtige Auswahl und Auslegung der Maschinenkomponenten sind Voraussetzung für eine erfolgreiche Maschinenkonstruktion.

Das Buch vermittelt den Lehrstoff, wie er im Bereich der Konstruktionstechnik von Werkzeugmaschinen in Fachschulen für Technik und in ingenieurwissenschaftlichen Hochschulen gefordert wird. Es liefert die Basis zur Maschinentechnik der Fertigungsprozesse und ist somit das Pendant und die Ergänzung zum Buch Industrielle Fertigung – Fertigungsverfahren – Mess- und Prüftechnik (Europa Nr. 53510, im selben Verlag).

### Die wichtigsten Inhalte sind:

- Spanende Werkzeugmaschinen (Drehmaschinen, Fräsmaschinen, Bohrmaschinen, Bearbeitungszentren, Schleifmaschinen),
- Abtragende Werkzeugmaschinen (EDM-, ECM-, Laser-, Wasserstrahl- und Ultrasonic-Maschinen),
- Umformende und zerteilende Maschinen (Pressen, CNC-Stanz- und Biegemaschinen),
- Druckgießmaschinen und Spritzgießmaschinen,
- Koordinatenmessmaschinen,
- Industrieroboter und AM-Maschinen (3D-Drucker),
- Komponenten und Maschinenelemente der Maschinen (Gestelle, Konfiguration, Führungen, Hauptantriebe, Vorschubsysteme),
- Statische, dynamische und thermische Eigenschaften, Fundamentierung,
- Messungen an Werkzeugmaschinen und Qualifizierung,
- Pneumatische und hydraulische Aggregate,
- Elektrische Steuerungen und Antriebe,
- Sicherheit, Dokumentation, Diagnose,
- Retrofitting.

Im Sinne der Allgemeinbildung wird bei den wichtigsten Techniken auch auf historische Zusammenhänge und Entstehungsgeschichten Bezug genommen. So werden die Fortschritte von der 1. bis zur 4. industriellen Revolution mit den zugehörigen Maschinen und Werkzeugen deutlich gemacht. Nur so lässt sich der heutige Stand der Technik wirklich verstehen und in seinen Werten einordnen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>9</b>		
<b>1.1</b>	<b>Branchenportrait</b> .....	<b>9</b>		
<b>1.2</b>	<b>Einteilung</b> .....	<b>10</b>		
<b>1.3</b>	<b>Entwicklungsphasen industrieller Technik</b> .....	<b>11</b>		
<b>1.4</b>	<b>Industrie 4.0</b> .....	<b>13</b>		
<b>1.5</b>	<b>Cyber-Physische Systeme (CPS)</b> .....	<b>14</b>		
<b>2</b>	<b>Spanende Werkzeugmaschinen</b> .....	<b>15</b>		
<b>2.1</b>	<b>Einteilung und Übersicht</b> .....	<b>15</b>		
2.1.1	Universelle Einzelmaschinen .....	15		
2.1.2	Mehrmaschinensysteme .....	16		
2.1.3	Unterscheidungsmerkmale .....	17		
2.1.3.1	Kinematik der Vorschubbewegung ...	17		
2.1.4	Art und Anzahl der Achsen .....	19		
2.1.5	Parallele und serielle Kinematik .....	22		
<b>2.2</b>	<b>Maschinenarten</b> .....	<b>23</b>		
2.2.1	Drehmaschinen .....	23		
2.2.1.1	Einführung .....	23		
2.2.1.2	Einteilung und Benennungen .....	24		
2.2.1.3	Universaldrehmaschinen (Werkstattendrehmaschine) .....	25		
2.2.1.4	Modular konfigurierbare Dreh- Fräszentren .....	28		
2.2.1.5	Vertikaldrehmaschine .....	29		
2.2.1.6	Drehautomat .....	30		
2.2.1.7	Mehrspindeldrehautomat .....	32		
2.2.1.8	Großdrehmaschinen .....	35		
2.2.1.9	Karussell-Drehmaschinen .....	36		
2.2.1.10	Drehräummaschinen .....	37		
2.2.1.11	Ultrapräzisions-Drehmaschinen .....	37		
2.2.1.12	Werkstückaufnahmen .....	38		
2.2.2	Fräsmaschinen und Bearbeitungs- zentren .....	43		
2.2.2.1	Einführung .....	43		
2.2.2.2	Serielle Kinematik .....	44		
2.2.2.3	Parallelkinematik (PKM) .....	52		
2.2.2.4	Werkzeugmagazine und Werkzeug- wechsler .....	55		
2.2.2.5	Werkstückhandhabung .....	60		
2.2.2.6	Mikrofräsmaschinen .....	65		
2.2.2.7	Werkzeugspannsysteme .....	66		
2.2.2.8	Werkzeugaufnahmen .....	69		
2.2.3	Bohrmaschinen .....	74		
2.2.3.1	Ständerbohrmaschinen .....	74		
2.2.3.2	Mehrspindelbohrmaschinen .....	74		
2.2.3.3	Tiefbohrmaschinen .....	75		
2.2.4	Sägemaschinen .....	76		
2.2.4.1	Allgemeines .....	76		
2.2.4.2	Bügelsägemaschinen .....	77		
2.2.4.3	Kreissägemaschinen .....	77		
2.2.4.4	Sägezentren .....	77		
2.2.4.5	Bandsägemaschinen .....	78		
2.2.4.6	Sondermaschinen .....	80		
2.2.4.7	Gestelle und Bauformen .....	81		
2.2.5	Verzahnungsmaschinen .....	82		
2.2.5.1	Einführung .....	82		
2.2.5.2	Weichbearbeitung .....	83		
2.2.5.3	Hart-Feinbearbeitung .....	87		
2.2.6	Schleifmaschinen .....	88		
2.2.6.1	Übersicht .....	88		
2.2.6.2	Schleifbearbeitungszentren .....	90		
2.2.6.3	Flachschleifmaschinen .....	91		
2.2.6.4	Rundschleifmaschinen .....	92		
2.2.6.5	Unrundschleifmaschinen .....	93		
2.2.6.6	Groß-Schleifmaschinen .....	94		
2.2.7	Schleif- und Schärfmaschinen für Werkzeuge .....	96		
<b>2.3</b>	<b>Aggregate, Zubehör und Zusatzfunktionen</b> .....	<b>97</b>		
2.3.1	Werkstückspannsysteme .....	97		
2.3.1.1	Allgemeines .....	97		
2.3.1.2	Mechanisches Spannen .....	97		
2.3.1.3	Mehrpunktspannen .....	98		
2.3.1.4	Modulare mechanische Spann- systeme .....	98		
2.3.1.5	Fluidische Spannsysteme .....	100		
2.3.1.6	Vakuum-Spannsysteme .....	103		
2.3.1.7	Magnetspanntechnik .....	104		
2.3.1.8	Gefrierspanntechnik .....	105		
2.3.1.9	Schwerlastspanntechnik .....	105		
2.3.2	Kühlschmierung .....	106		
2.3.2.1	Nassbearbeitung .....	106		
2.3.2.2	Minimalmengenschmierung Trockenbearbeitung .....	107		
2.3.3	Späne- und Kühlschmiermittel- entsorgung .....	109		
2.3.3.1	Späneaustrag aus der Maschine .....	110		
2.3.3.2	Zentralanlagen zur Späne- entsorgung .....	111		
2.3.3.3	Kühlschmiermittel-Transport und Filterarten .....	112		
2.3.3.4	Gestaltungshinweise .....	114		

2.3.4	Messen in der Maschine.....	115	2.5.5.2	Gesichtspunkte zur Gestaltung .....	199
2.3.4.1	Prüfen und Messen der Werkzeuge .	115	2.5.5.3	Kugelgewindetrieb (KGT) .....	204
2.3.4.2	Prüfen und Messen mit Messtaster.	117	2.5.5.4	Rollengewindetriebe (RGT) .....	212
<b>2.4</b>	<b>Mehrmaschinensysteme .....</b>	<b>120</b>	2.5.5.5	Zahnstange-Ritzel-Antrieb .....	214
2.4.1	Einzweckmehrmaschinensysteme .	121	2.5.5.6	Direktantrieb .....	217
2.4.1.1	Längstaktmaschinen .....	121	2.5.5.7	Kinematik mit Zusatzachsen.....	220
2.4.1.2	Rundtaktmaschinen .....	125	2.5.5.8	Gewichtsausgleich .....	225
2.4.2	Flexible Fertigungssysteme (FFS)...	127	2.5.5.9	Längenmesssysteme und Winkelmesssysteme .....	226
2.4.2.1	Historische Entwicklungen .....	127	2.5.6	Zentralschmierung .....	230
2.4.2.2	Ersetzende und ergänzende Maschinen.....	128	2.5.7	Fundamentierung.....	231
2.4.2.3	Agile Fertigungssysteme .....	129	<b>2.6</b>	<b>Messungen an Werkzeug-</b> <b>maschinen .....</b>	<b>233</b>
<b>2.5</b>	<b>Konstruktion, Komponenten und Maschinenelemente .....</b>	<b>130</b>	2.6.1	Kraftmessung .....	233
2.5.1	Allgemeines.....	130	2.6.1.1	Messung statischer Kräfte .....	234
2.5.1.1	Maschinenkenngrößen.....	130	2.6.1.2	Messung dynamischer Kräfte .....	234
2.5.1.2	Baugruppen .....	133	2.6.2	Verlagerungs- und Verformungs- messung .....	236
2.5.2	Gestelle und allgemeine Eigenschaften .....	134	2.6.3	Steifigkeits- und Nachgiebigkeits- messung .....	237
2.5.2.1	Werkstoffe .....	134	2.6.3.1	Messung statischer Steifigkeit .....	237
2.5.2.2	Maßhaltigkeit .....	139	2.6.3.2	Messung dynamischer Nach- giebigkeit .....	238
2.5.2.3	Statische Maschineneigenschaften..	141	2.6.4	Schwingungsmessung und Schwingungsdiagnose .....	241
2.5.2.4	Dynamische Maschineneigen- schaften.....	144	2.6.4.1	Signalerfassung und Signal- auswertung.....	241
2.5.2.5	Thermische Maschineneigen- schaften.....	148	2.6.4.2	Diagnose von Schwingungs- ursachen .....	242
2.5.3	Führungen .....	153	2.6.4.3	Rattermarkendiagnose .....	243
2.5.3.1	Allgemeine Anforderungen.....	153	2.6.5	Schwingungsformanalyse.....	244
2.5.3.2	Wälzführungen .....	155	2.6.6	Fundament- und Geschossdecken- messung .....	245
2.5.3.3	Hydrodynamische Führungen.....	161	2.6.6.1	Messungen an Fundamenten .....	245
2.5.3.4	Hydrostatische Führungen .....	164	2.6.6.2	Messungen an Geschossdecken....	246
2.5.3.5	Aerostatische Führungen .....	167	2.6.6.3	Auswirkung von Boden- schwingungen .....	246
2.5.3.6	Magnetische Führungen.....	168	2.6.7	Dynamischer Spindelrundlauf .....	247
2.5.4	Hauptantriebe und Werkzeug- spindeln .....	169	2.6.8	Lang- und Kurzzeitmessung von Temperaturen .....	247
2.5.4.1	Allgemeines.....	169	2.6.9	Geräuschmessung und Geräusch- beurteilung .....	249
2.5.4.2	Der traditionelle Hauptantrieb .....	170	<b>2.7</b>	<b>Qualifizierung spanender Werkzeugmaschinen .....</b>	<b>251</b>
2.5.3.3	Getriebe .....	172	2.7.1	Einleitung und Übersicht.....	251
2.5.4.4	Einbaumotoren für Spindeln.....	176	2.7.2	Direkte Messungen der Maschineneigenschaften .....	252
2.5.4.5	Wälzlagerung.....	179	2.7.3	Abnahme- und Prüfwerkstücke.....	258
2.5.4.6	Hydrostatische Spindellagerung....	186	2.7.4	Fähigkeitsuntersuchungen .....	262
2.5.4.7	Aerostatische Spindellagerung.....	187			
2.5.4.8	Magnetlager .....	188			
2.5.4.9	Motorspindeln .....	189			
2.5.4.10	Fremdgetriebene Spindeln und modulare Getriebespindeln .....	192			
2.5.5	Vorschubsysteme .....	193			
2.5.5.1	Überblick und allgemeine Anforderungen .....	193			

<b>3</b>	<b>Abtragende Werkzeugmaschinen ...</b>	<b>265</b>	<b>4.6</b>	<b>CNC-Stanzmaschinen .....</b>	<b>322</b>
<b>3.1</b>	<b>Funkerosionsmaschinen (EDM) ..</b>	<b>265</b>	<b>4.7</b>	<b>CNC-Biegemaschinen .....</b>	<b>323</b>
3.1.1	Maschinen zum funkerosiven Senken .....	265	4.7.1	CNC-Rohr- und Stangenbiege- maschine.....	323
3.1.2	Maschinen zum funkerosiven Bohren.....	269	4.7.2	CNC-Gesenkbiegemaschinen.....	324
3.1.3	Maschinen zum funkerosiven Schneiden .....	270	<b>4.8</b>	<b>Flexible Blechbearbeitungs- systeme.....</b>	<b>325</b>
<b>3.2</b>	<b>Elektrochemische Abtrag- maschinen (ECM) .....</b>	<b>271</b>	<b>5</b>	<b>Werkzeugmaschinen der Urformtechnik .....</b>	<b>326</b>
3.2.1	Maschinen zum elektrochemischen Senken .....	271	<b>5.1</b>	<b>Vorbemerkung.....</b>	<b>326</b>
3.2.2	Maschinen zum elektrochemischen Entgraten und/oder Polieren .....	272	<b>5.2</b>	<b>Druckgießmaschinen .....</b>	<b>327</b>
<b>3.3</b>	<b>Laserabtragmaschinen .....</b>	<b>273</b>	5.2.1	Warmkammer-Maschinen und Kaltkammer-Maschinen .....	327
<b>3.4</b>	<b>Wasserstrahlschneidanlagen .....</b>	<b>275</b>	5.2.2	Aufbau.....	329
<b>3.5</b>	<b>Ultraschallerosionsmaschinen.....</b>	<b>277</b>	5.2.3	Funktionsablauf.....	330
<b>4</b>	<b>Werkzeugmaschinen der Umformtechnik und Zerteiltechnik .....</b>	<b>278</b>	5.2.4	Vacural-Druckgießmaschine.....	331
<b>4.1</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>278</b>	5.2.5	Prozessparameter.....	331
4.1.1	Definition .....	278	5.2.6	Flexible Druckgießzelle .....	332
4.1.2	Geschichtliche Entwicklung und Bedeutung .....	279	<b>5.3</b>	<b>Werkzeugmaschinen für Kunststoffe.....</b>	<b>333</b>
<b>4.2</b>	<b>Einteilung .....</b>	<b>282</b>	5.3.1	Spritzgießmaschinen .....	333
<b>4.3</b>	<b>Baugruppen der Pressen .....</b>	<b>283</b>	5.3.1.1	Wirtschaftliche Bedeutung.....	333
4.3.1	Gliederung.....	283	5.3.1.2	Historische Entwicklung.....	333
4.3.2	Maschinengestelle .....	283	5.3.1.3	Wirkprinzip.....	334
4.3.3	Stößel und Pressentisch .....	286	5.3.1.4	Der Standard-Zyklusablauf .....	335
4.3.4	Führungen .....	286	5.3.1.5	Wichtige Maschinenelemente .....	336
4.3.5	Antriebe .....	289	5.3.1.6	Funktionseinheiten.....	339
<b>4.4</b>	<b>Kenngößen.....</b>	<b>292</b>	5.3.1.7	Prozessparameter.....	344
<b>4.5</b>	<b>Pressen.....</b>	<b>295</b>	5.3.1.8	Weitere Spritzgießverfahren .....	347
4.5.1	Weggebundene Pressen.....	295	5.3.2	Schaumgießmaschinen .....	350
4.5.1.1	Aufbau .....	295	5.3.2.1	Partikel-Schäumen .....	350
4.5.1.2	Getriebebauarten .....	297	5.3.2.2	Reaktions-Gießen.....	350
4.5.1.3	Verstelleinrichtungen .....	303	5.3.2.3	Harz-Injektions-Maschinen .....	351
4.5.2	Kraftgebundene Pressen .....	305	5.3.3	Blasform-Maschinen .....	352
4.5.3	Energiegebundene Umform- maschinen.....	308	5.3.4	Thermoform-Maschinen.....	353
4.5.3.1	Hämmer .....	308	<b>6</b>	<b>Industrieroboter .....</b>	<b>354</b>
4.5.3.2	Spindelpressen.....	311	<b>6.1</b>	<b>Roboter für Bearbeitungs- aufgaben .....</b>	<b>354</b>
4.5.3.3	Servopressen.....	313	<b>6.2</b>	<b>Der kinematische Aufbau .....</b>	<b>356</b>
4.5.5.4	Pressenperipherie .....	318	<b>6.3</b>	<b>Aufbau und Komponenten .....</b>	<b>359</b>
			6.3.1	Handachsen .....	359
			6.3.2	Reduziergetriebe .....	361
			6.3.3	Gewichtsausgleich .....	363

<b>6.4</b>	<b>Messungen und Qualifizierung</b> .....	<b>365</b>	7.5.2	Pulverzuführung .....	392
6.4.1	Übersicht und Allgemeines .....	365	7.5.3	Materialbevorratung .....	393
6.4.2	Pose-Genauigkeit und Pose-Wiederholgenauigkeit .....	366	7.5.4	Formbehälter .....	393
6.4.3	Lineargenauigkeit/Bahngenauigkeit .....	369	<b>7.6</b>	<b>Aufbau flüssigkeitsverarbeitender Systeme</b> .....	<b>394</b>
6.4.4	Formgenauigkeit/Ebenen-genauigkeit .....	370	<b>7.7</b>	<b>Aufbau laminierender Systeme</b> .....	<b>396</b>
6.4.5	Dynamisches Bewegungsverhalten .....	371	7.7.1	Materialversorgung .....	396
6.4.6	Positions-Stabilisierungszeit .....	372	7.7.2	Konturschneiden .....	396
6.4.7	Statische Nachgiebigkeit .....	373	7.7.3	Schichtverbinden .....	397
6.4.8	Weitere Merkmale .....	373	<b>7.8</b>	<b>Drucksysteme</b> .....	<b>398</b>
<b>6.5</b>	<b>Frequenzkenngrößen der Achsantriebe</b> .....	<b>374</b>	7.8.1	Allgemeines .....	398
<b>7</b>	<b>3D-Drucker/AM-Maschinen</b> .....	<b>375</b>	7.8.2	Druckverfahren .....	399
<b>7.1</b>	<b>Additive Manufacturing (AM), Übersicht</b> .....	<b>375</b>	7.8.3	Auflösung, Genauigkeit, Frequenz ..	402
7.1.1	Funktion additiver Fertigungsverfahren .....	375	7.8.4	Aufbau der Drucksysteme .....	403
7.1.2	Die Prozesskette .....	375	<b>7.9</b>	<b>Lasersysteme</b> .....	<b>404</b>
7.1.3	Auflösung und Genauigkeiten .....	376	<b>7.10</b>	<b>Maskensysteme</b> .....	<b>406</b>
<b>7.2</b>	<b>Einteilung der Schichtbauverfahren</b> .....	<b>377</b>	<b>7.11</b>	<b>Thermische Düsensysteme</b> .....	<b>407</b>
<b>7.3</b>	<b>Prozesse und Verfahren</b> .....	<b>379</b>	7.11.1	Extrusionsköpfe für drahtförmige Werkstoffe .....	407
7.3.1	Strahlschmelzen .....	379	7.11.2	Extrusionsköpfe für thermisch plastifizierte Werkstoffe .....	408
7.3.2	3D-Druckverfahren .....	380	7.11.3	Extrusionsköpfe für thermisch geschmolzen Metalle .....	408
7.3.3	Stereolithografie – SL .....	381	<b>7.12</b>	<b>Hybridsysteme</b> .....	<b>409</b>
7.3.4	Fused Layer Modeling – FLM .....	381	<b>8</b>	<b>Koordinatenmessmaschinen</b> .....	<b>410</b>
7.3.5	Layer Laminated Manufacturing – LLM .....	381	<b>8.1</b>	<b>Vergleich Koordinatenmessmaschine und Werkzeugmaschine</b> ..	<b>410</b>
<b>7.4</b>	<b>Aufbau additiver Produktionsanlagen</b> .....	<b>382</b>	<b>8.2</b>	<b>Übersicht zu Koordinatenmesssystemen</b> .....	<b>412</b>
7.4.1	X-Y-Bauebene .....	382	<b>8.3</b>	<b>Bauformen von Koordinatenmessmaschinen, Morphologie</b> .....	<b>413</b>
7.4.2	Z-Achse .....	384	8.3.1	Portalbauart .....	413
7.4.2.1	Z-Achse in konventionellen Systemen .....	384	8.3.2	Brückenbauart .....	415
7.4.2.2	Kastenloses Bauen .....	386	8.3.3	Ständerbauart oder Horizontalarmbauart .....	416
7.4.2.3	Continuous 3D-Printing .....	387	8.3.4	Auslegerbauart .....	417
7.4.2.4	Parallelkinematik .....	388	8.3.5	Weitere Bauarten .....	418
7.4.2.5	Portalanlagen – „Contour Crafting“ ..	389	<b>8.4</b>	<b>Werkstoffauswahl</b> .....	<b>419</b>
7.4.2.6	5-Achssysteme .....	389	<b>8.5</b>	<b>Technologie der Lagerungen</b> .....	<b>421</b>
7.4.3	Prozesskammer .....	390	<b>8.6</b>	<b>Antriebe</b> .....	<b>423</b>
7.4.4	Maschinengestell .....	390	<b>8.7</b>	<b>Messsysteme</b> .....	<b>425</b>
<b>7.5</b>	<b>Aufbau pulververarbeitender Systeme</b> .....	<b>391</b>	<b>8.8</b>	<b>Fehlerkorrekturen und Korrekturverfahren</b> .....	<b>426</b>
7.5.1	Beschichtungssysteme .....	391	<b>8.9</b>	<b>Fundamentierung, Messplatte und Werkstücklagerung</b> .....	<b>429</b>

<b>9</b>	<b>Hydraulik und Pneumatik .....</b>	<b>431</b>	10.2.2.4	Feininterpolation .....	465
<b>9.1</b>	<b>Hydraulik.....</b>	<b>431</b>	10.2.2.5	Achsregelung.....	465
9.1.1	Hydrostatik.....	431	10.2.3	Anwenderkoordinatensysteme.....	466
9.1.2	Hydrauliköl.....	432	10.2.4	Technologiesteuerung .....	467
9.1.3	Hydraulikstation .....	433	10.2.5	Roboterprogrammierung .....	469
9.1.4	Bauformen für Zylinder .....	434	10.2.6	Sicherheitssysteme.....	470
9.1.5	Ventile .....	434	10.2.7	Inbetriebnahme/Service .....	471
9.1.6	Speicher .....	435	<b>10.3</b>	<b>Antriebstechnik .....</b>	<b>472</b>
9.1.7	Schaltungen.....	436	10.3.1	Grundprinzip eines Umrichters.....	473
9.1.7.1	Elastizität der Komponenten .....	436	10.3.2	Vorschubmotoren.....	475
9.1.7.2	Primärsteuerung .....	436	10.3.2.1	Rotatorische Vorschubmotoren.....	475
9.1.7.3	Sekundärsteuerung .....	436	10.3.2.2	Direktantriebe.....	476
<b>9.2</b>	<b>Pneumatik.....</b>	<b>438</b>	10.3.3	Hauptantriebe.....	477
9.2.1	Drucklufterzeugung .....	438	10.3.4	Hilfsantriebe .....	479
9.2.2	Druckluftnetz.....	439	10.3.5	Energieeffizienz .....	479
9.2.3	Ventile .....	439	10.3.6	Antriebsauslegung.....	480
9.2.4	Aktoren.....	440	<b>11</b>	<b>Querschnittsaufgaben .....</b>	<b>482</b>
<b>10</b>	<b>Elektrische Steuerungen und Antriebe .....</b>	<b>442</b>	<b>11.1</b>	<b>Funktionale Sicherheitstechniken ..</b>	<b>482</b>
<b>10.1</b>	<b>CNC-Steuerungen .....</b>	<b>442</b>	11.1.1	Einführung .....	482
10.1.1	Grundprinzip und Schnittstellen .....	443	11.1.2	Risikoeinschätzung.....	483
10.1.2	NC-Kanäle, Betriebsartengruppen..	445	11.1.3	Prinzip integrierter Sicherheits- systeme.....	484
10.1.3	Messsysteme.....	447	11.1.4	Ausführungsbeispiel „Safety Integrated“ .....	485
10.1.4	NC-Programmierung .....	449	<b>11.2</b>	<b>Europäische Sicherheitsnormen ....</b>	<b>486</b>
10.1.5	Funktionserweiterungen .....	450	<b>11.3</b>	<b>Dokumentation .....</b>	<b>487</b>
10.1.5.1	Werkzeugkorrektur .....	450	11.3.1	Allgemeines zur Dokumentation ...	487
10.1.5.2	Kompensationen .....	451	11.3.2	Anforderungen an die Dokumentation.....	487
10.1.5.3	Transformationen.....	452	11.3.3	Begleitende Dokumente einer..... Werkzeugmaschine .....	487
10.1.5.4	Elektronische Getriebe.....	453	11.3.4	Vielfältige Formen der Dokumentation.....	488
10.1.5.5	Werkzeugüberwachung .....	453	11.3.5	Applikationsunterstützung .....	489
10.1.5.6	Kollisionsüberwachung .....	454	11.3.5.3	Video-Tutorials .....	490
10.1.5.7	Virtuelle Maschine.....	454	11.3.6	Dokumentationserstellung .....	490
10.1.5.8	Offenheit im NC-Kern.....	454	<b>11.4</b>	<b>Diagnose, Teleservice .....</b>	<b>491</b>
10.1.6	Anpasssteuerung .....	455	11.4.1	Wartung .....	491
10.1.7	Kommunikationsschnittstellen.....	456	11.4.2	Diagnose .....	491
10.1.8	Hardwareausprägung .....	457	<b>11.5</b>	<b>Retrofit von Werkzeugmaschinen ...</b>	<b>494</b>
10.1.9	Softwarearchitektur .....	457	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>495</b>	
<b>10.2</b>	<b>Robotersteuerungen.....</b>	<b>458</b>	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>500</b>	
10.2.1	Historie.....	458	<b>Bildquellenverzeichnis .....</b>	<b>507</b>	
10.2.2	Grundlagen der Bewegungs- steuerung.....	459			
10.2.2.1	Koordinatentransformationen und Berechnungen zur Kinetik .....	460			
10.2.2.2	Interpolation .....	462			
10.2.2.3	Achsverkopplung und Achsentkopplung .....	464			

# 1 Einführung

## 1.1 Branchenportrait

Die Werkzeugmaschinenbranche beschäftigt in Deutschland etwa 70 000 Personen und erwirtschaftet einen Umsatz von rund 14 Milliarden Euro (Bild 1), davon 9 Milliarden Euro mit dem Ausland [009-1]. Sie ist zusammen mit Japan weltweit an führender Stelle. Starke Wettbewerber gibt es, außer in Japan, in Italien und in der Schweiz, zunehmend auch in den osteuropäischen und den anderen asiatischen Ländern, wie z. B. China und Südkorea.

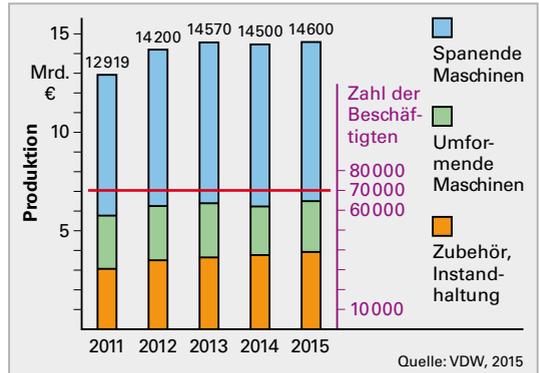
Die Werkzeugmaschinenentwicklung ist von einer stetig zunehmenden Leistungsfähigkeit geprägt, d. h.

- Verkürzung der Produktionszeiten,
- Erhöhung der Genauigkeiten,
- Erweiterung auf komplexere Bauteilgeometrie,
- größere Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Werkstücke und Werkstoffe und
- geringeren Ressourcenverbrauch.

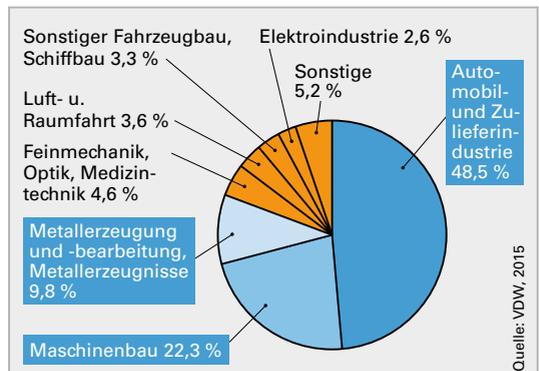
Zwischen der Werkzeugmaschinenindustrie einerseits und der Automobilbranche und dem Maschinenbau als den Hauptkunden (Bild 2) andererseits besteht eine symbiotische Beziehung. Die hochproduktive Werkzeugmaschine ist Voraussetzung für die Herstellung von Fahrzeugen und Maschinen und umgekehrt sind die Forderungen dieser Industrien an die Werkzeugmaschinenhersteller die eigentlichen Triebfedern für deren Entwicklungen. Bedingt durch die tragende Rolle der Automobilindustrie und der Maschinenbaubranche allgemein in unserer Gesellschaft kommt der Werkzeugmaschinenindustrie zusammen mit den Werkzeugherstellern die Funktion als Schlüsselindustrie zu. Alle industriell gefertigten Güter werden mittelbar oder unmittelbar mit Werkzeugmaschinen gefertigt.

Wo immer auf der Welt Fahrzeuge oder Maschinen hergestellt werden, findet man einen erheblichen Anteil an deutschen, schweizerischen und italienischen Werkzeugmaschinen in den Fabrikhallen. Die Exportquote liegt bei etwa 60 %. Die derzeit wichtigsten Absatzmärkte (Bild 3) sind nach den EU-Staaten: China, USA und Russland.

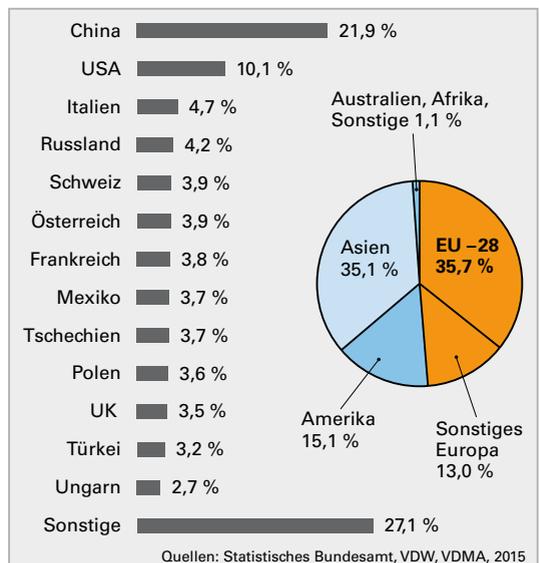
Die Werkzeugmaschinenindustrie ist überwiegend mittelständisch geprägt: 7 % der Hersteller haben mehr als 1 000 Beschäftigte, rund 54 % der Unternehmen beschäftigen weniger als 250 Mitarbeiter [009-1].



**Bild 1: Umsatz und Zahl der Beschäftigten in der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie**



**Bild 2: Anwenderbranchen der Werkzeugmaschinen**



**Bild 3: Exporte der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie**

## 1.2 Einteilung

Werkzeugmaschinen werden gegliedert in Anlehnung an die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [010-1]: *Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaftenändern*. Die Durchführung der Fertigung geschieht in der Industriegesellschaft mit maschinellen Werkzeugen (engl. machine tools), den *Werkzeugmaschinen*. Die wirtschaftlich wichtigsten Werkzeugmaschinen sind für Deutschland:

- die spanenden Werkzeugmaschinen und
- die umformenden Werkzeugmaschinen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Werkzeugmaschinen-Produktion in Deutschland, Umsatzanteile	
Bearbeitungszentren, Flexible Systeme	12,6 %
Drehmaschinen und Drehzentren	10,6 %
Schleif-, Hon-, Läppmaschinen	8,2 %
Fräsmaschinen	6,7 %
Transfer-, Mehrwegemaschinen	5,9 %
Verzahn- und Zahnfertigbearbeitungsmaschinen	3,6 %
Laser-, Ultraschall-, Ionen-/Plasmastrahlmaschinen	2,7 %
Säge-, Trennmaschinen	1,3 %
Ausbohrmaschinen, Ausbohr- und Fräsmaschinen	1 %
Bohrmaschinen	0,6 %
Erodiermaschinen	0,6 %
Sonstige spanende Maschinen	0,7 %
<b>Spanende und abtragende Werkzeugmaschinen, gesamt</b>	<b>54,5 %</b>
Pressmaschinen	8,3 %
Biege-, Abkant-, Richtmaschinen	3,9 %
Scheren, Stanzen	2,9 %
Schmiedemaschinen und Schmiedehämmer (inkl. Pressen)	1,9 %
Drahtbearbeitungsmaschinen und Drahtverarbeitungsanlagen	1,8 %
Sonstige umformende Maschinen	3,2 %
<b>Umformende + zerteilende Werkzeugmaschinen, gesamt</b>	<b>22 %</b>
<b>Teile und Zubehör für Werkzeugmaschinen, gesamt</b>	<b>15,8 %</b>
<b>Installation, Reparatur/Instandhaltung, gesamt</b>	<b>7,7 %</b>
Gesamt (Quelle VDW, 2015)	100 %

Werkzeugmaschinen sind mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtungen, die durch relative Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen, DIN 69 651-1 [010-2].

Beim **Umformen** wird auf einer Fertigungsanlage, z. B. einer **Presse**, durch plastisches Ändern eines festen Körpers, z. B. eines Blechs, mithilfe eines Werkzeugs ein Karosserieteil hergestellt. Durch ein schneidendes Werkzeug wird die Presse zu einer **zerteilenden Werkzeugmaschine**. Zum Zerteilen, wie auch zum Umformen werden allgemein Pressmaschinen oder Hämmer verwendet.

Beim **Trennen** wird durch **Spanen** oder **Abtragen** der Werkstoffzusammenhalt partiell vermindert. Man spricht auch von *subtraktiven Fertigungsverfahren*. Das Trennen durch Spanbildung erfolgt mit den **spanenden Werkzeugmaschinen**. Diese Maschinen verwenden Formwerkzeuge, z. B. Stufenbohrer oder Universalwerkzeuge (z. B. Drehmeißel) und die gewollte Form entsteht durch die räumliche Relativbewegung zwischen Werkzeugschneide und Werkstück. Die wichtigsten Werkzeugmaschinen zum **Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide** sind: Die Drehmaschinen, Fräsmaschinen, Bohrmaschinen, Sägemaschinen und Verzahnungsmaschinen.

Die wichtigsten Werkzeugmaschinen zum **Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide** sind: Die Schleifmaschinen, die Honmaschinen und die Läppmaschinen.

Maschinen, die partiell Werkstoff durch Strahlung oder Erosion abtragen nennt man **abtragende Werkzeugmaschinen**. Sie arbeiten entweder mit einem formgebenden Werkzeug oder einem Universalwerkzeug, z. B. einer Strahldüse oder einem Draht, und erzeugen die Werkstückform durch den Bewegungsprozess zwischen Werkstück und Werkzeug, z. B. durch Funkenerosion.

Werkzeugmaschinen, welche mehrere Verfahren in sich bergen, nennt man **Bearbeitungszentren**.

Maschinen, bei denen der Werkstoff formlos ist, also wenn kein Werkstück bereits vorliegt, gehören nach enger Auslegung von DIN 69 651-1 nicht zu den Werkzeugmaschinen, wenngleich einige davon maschinentechnisch sehr verwandt dazu sind, z. B. die **Druckgießmaschinen** und **Spritzgießmaschinen**. Sie sind den Pressen bis auf die Werkzeuge ähnlich.

Bei den **additiven Fertigungsverfahren/3D-Druck** werden Materialien unterschiedlichster Art, z. B. Metalle oder Polymere in Pulverform, als Flüssigkeit oder als Gas in eine feste Gestalt gebracht; nämlich aufbauend, also additiv und zumeist in dünnen Schichten. **Die Werkzeuge wirken punktförmig, linienhaft oder flächig**. Die zugehörigen Maschinen werden oft **3D-Drucker** genannt. Dabei sind die Maschinen nur z. T. funktionell und gerätetechnisch den Druckern zugehörig. Aufgrund ihrer stark zunehmenden Bedeutung in der Bauteilherstellung sind diese Maschinen auch im Sinne von *Werkzeugmaschinen der Zukunft* in dieses Buch mit aufgenommen.

## 1.3 Entwicklungsphasen industrieller Technik

### Erste industrielle Revolution

Die erste industrielle Revolution begann **um 1800** mit der Mechanisierung der Produktion mit Dampfkraft (**Bild 1**). Die Muskelkraft der Menschen und Tiere sowie in Teilen die Wasserkraft wurden durch Dampfmaschinen ersetzt. Zum Ende des 18. Jahrhunderts kamen als Antriebsaggregate Elektromotoren und Verbrennungsmotoren hinzu. Es entwickelten sich aus den bisherigen Manufakturen die Fabriken. Man begann *serienidentische Teile* herzustellen.

### Zweite industrielle Revolution

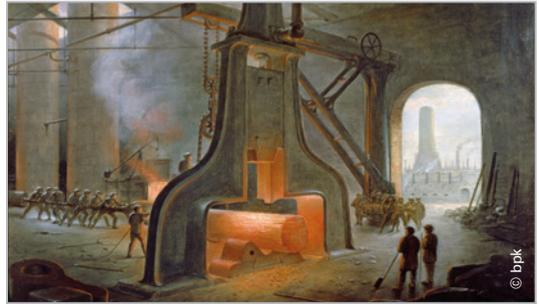
Mit der zweiten industriellen Revolution kam die Massenproduktion, und zwar vor allem mithilfe von elektrisch angetriebenen Maschinen. So wurden mit Beginn des **20. Jahrhunderts** neben Waffen auch Kraftfahrzeuge und Haushaltsgeräte in größeren Mengen produziert (**Bild 2**).

### Dritte industrielle Revolution

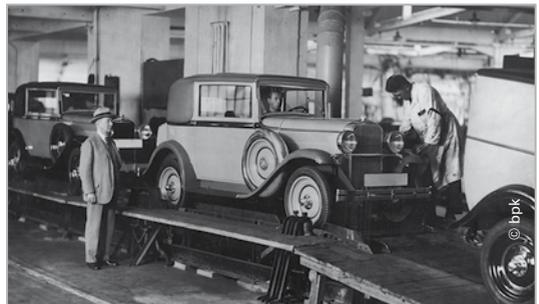
Die dritte industrielle Revolution begann **um 1970** mit der Verwendung von Transistoren und Dioden zur digitalen Datenverarbeitung in Maschinensteuerungen. Man begann Maschinen numerisch (digital) zu steuern. Es entstand die numerische Steuerung (Numerical Control, NC). Die **NC-Maschine (Bild 3)** verdrängte Zug um Zug handgesteuerte und mechanisch automatisierte Maschinen. Der wirkliche Durchbruch kam mit der Entwicklung der integrierten Schaltkreise und Mikroprozessoren und deren Integration in Maschinensteuerungen und in Produkte, z. B. als Mikrorechner und als speicherprogrammierte Steuerungen (SPS).

Eingeführt sind seither die **CAX-Systeme**:

- **CAD-Systeme** (Design) für das Zeichnen und Konstruieren (**Bild 4**),
- **CAM-Systeme** (Manufacturing) für den Herstellungsprozess,
- **CAQ-Systeme** (Quality-Assurance) für die Qualitätsprüfung und
- **CIM** (Computerintegrierte Fertigung) für die Gesamtheit der Produktionskette.



**Bild 1: Dampfhammer (1839) von James Nasmyth<sup>1</sup>**



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



**Bild 3: NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)**



**Bild 4: 2D-CAD-System (1998)**

<sup>1</sup> James Nasmyth, 1808 bis 1890, war schottischer Kunstmaler und Ingenieur. Er gilt als Erfinder des Dampfhammers und der Dampftramme.

## Vierte industrielle Revolution

Die vierte industrielle Revolution, etwa seit dem **Jahr 2000**, wird geprägt durch die Allgegenwart des **Internets**.

Das Internet<sup>1</sup> wurde ab 1980 als Plattform zum Datenaustausch unter den Großrechnern der Universitäten und Forschungsinstitute eingeführt. Inzwischen ist das Internet bei jedermann angekommen, in alle Bereiche der Gesellschaft vorgedrungen und lebensbestimmend geworden. Es dient nicht mehr nur zur bloßen Übermittlung von Information, sondern wurde maßgeblicher Bestandteil zur Steuerung und Regelung von Vorgängen aller Art. Es gibt weltweit mehr als eine halbe Milliarde Webserver.

Mithilfe des Internets werden

- Bankgeschäfte abgewickelt,
- Steuererklärungen gemacht,
- telefoniert,
- Waren geordert und zum Kunden gelenkt,
- Produktionsprozesse angestoßen, gesteuert und überwacht.

### Ein großflächiger und ein länger anhaltender Ausfall des Internets wäre eine große, lebensbedrohende Katastrophe.

Die Integration internetfähiger bzw. kommunikationsfähiger Elektronik in die Dinge des Alltags, z. B. in Mobiltelefone, in Kameras, in Fahrzeuge und in Maschinen und Anlagen ermöglicht eine allumfassende Information und das Ingangsetzen selbsttätig entfernender Prozesse (**Bild 1**).

Die Vernetzung von physikalisch-technischen Systemen mit virtuellen, nämlich programmierten Prozessen wird zum „Internet der Dinge und Dienste“ und kennzeichnet die vierte industrielle Revolution.

**Mit Industrie 4.0** wird die vierte industrielle Revolution, nämlich die totale digitale Vernetzung der Maschinen, Anlagen und Produkte sowie der zugehörigen Dienste eingeleitet.

### Gefahren bei Industrie 4.0

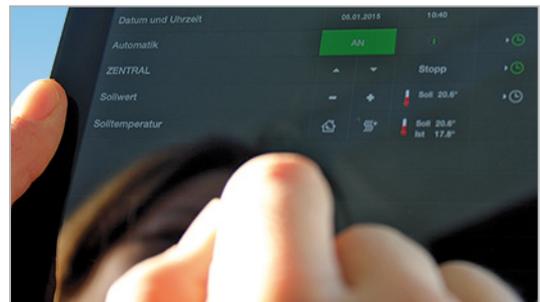
Steuerungsgeräte von Produktionsmaschinen (SPS) waren lange Zeit eine eigene Welt mit eigener, firmenspezifischer Software und Hardware, mit dem Problem, mit Konkurrenz-

produkten nicht kompatibel und kommunikationsfähig zu sein. Inzwischen sind diese Geräte über IP-Standards vernetzt. Das hat Standardisierungsvorteile, hat alle Vorteile der Fernwartung und Fernsteuerung, aber es hat den entscheidenden Nachteil, üblichen Hacker-Angriffsmethoden ausgesetzt zu sein.

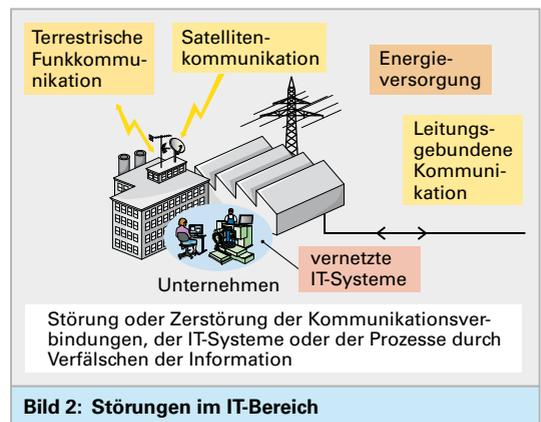
**Gefahren** gibt es durch Fehler oder Sabotage in den Netzwerken, z. B. durch Ausfall oder Fehlschaltungen von Verbindungen und von Servern für die Kommunikation, die Produktion, die Logistik, die Energieübertragung (**Bild 2**).

**Gefahren** gibt es durch Spionagesysteme und *malware*<sup>2</sup> (Schadprogramme), welche darauf ausgerichtet sind, Zerstörungen anzurichten und Unheil zu bringen.

IT-Systeme allgemeiner Art werden häufig mit Anlagensteuerungen verbunden oder in diese integriert. Hier ist eine hinreichende Segregation unerlässlich, um zu verhindern, dass sich Schadprogramme und Ausspähungen über Teilsystemgrenzen hinweg ausbreiten können.



**Bild 1: Temperatursteuerung über ein Smartphone**



**Bild 2: Störungen im IT-Bereich**

<sup>1</sup> Internet von engl. internetwork = Zwischennetzwerk von miteinander verbundenen Netzen

<sup>2</sup> engl. malware, Kunstwort aus engl. malicious = bösartig und software

## 1.4 Industrie 4.0

Industrie 4.0 ist ein Zukunftsprojekt der deutschen Bundesregierung, mit dem die informationstechnische Vernetzung, insbesondere der Produktionstechnik, vorangetrieben werden soll.

### Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Zitat) [013-1]:

*Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 zielt darauf ab, die deutsche Industrie in die Lage zu versetzen, für die Zukunft der Produktion gerüstet zu sein. Industrieproduktion wird gekennzeichnet sein durch starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien-) Produktion, die weitgehende Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse und die Verkopplung von Produktion und hochwertigen Dienstleistungen.*

*Die Wirtschaft steht an der Schwelle zur vierten industriellen Revolution. Durch das Internet getrieben, wachsen reale und virtuelle Welt immer weiter zu einem Internet der Dinge zusammen.*

*Die Kennzeichen der zukünftigen Form der Industrieproduktion sind die starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien-) Produktion, die weitgehende Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse und die Verkopplung von Produktion und hochwertigen Dienstleistungen, die in sogenannten hybriden Produkten mündet.*

*Die deutsche Industrie hat jetzt die Chance, die vierte industrielle Revolution aktiv mitzugestalten. Mit dem Zukunftsprojekt Industrie 4.0 wollen wir diesen Prozess unterstützen.*

Ziel von Industrie 4.0 sind intelligente (smarte<sup>1</sup>) Fabriken. Diese zeichnen sich aus durch:

- Wandlungsfähigkeit,
- Ressourceneffizienz,
- Ergonomie und
- Kundenorientierung.

Die heute übliche Produktionsplanung und -steuerung mit der Vorgabe von Arbeitsschritten könnte abgelöst werden, indem z. B. die Werkstücke die Abläufe selbst organisieren. Rohlinge, Fabrikate und Produkte werden **smart**<sup>1</sup>. Sie machen sich ihre Prozesse selbst.

Die Produkte sind mit speicherfähigen RFIDs<sup>2</sup> versehen (**Bild 1**) oder tragen zumindest eingeprägte Codes (**Bild 2**) zur Kennung. Die Produktionsmittel und Logistikkomponenten sind als „embedded<sup>3</sup> systems“ konzipiert (**Bild 2**) und prinzipiell internetfähig.

Embedded Systems sind Produkte mit integrierten (eingebetteten) Computern bzw. Mikrocomputern oder Mikroprozessoren zum Zweck der Steuerung, Regelung, Visualisierung bzw. der Automatisierung.

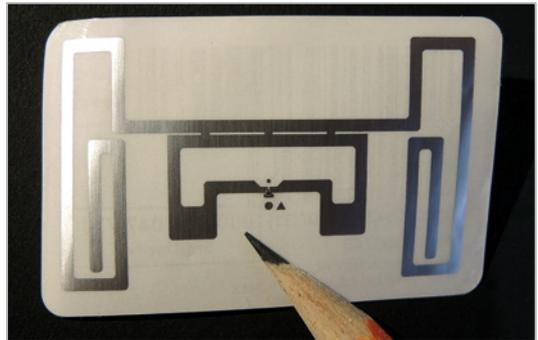


Bild 1: RFID-Klebe-Etikett

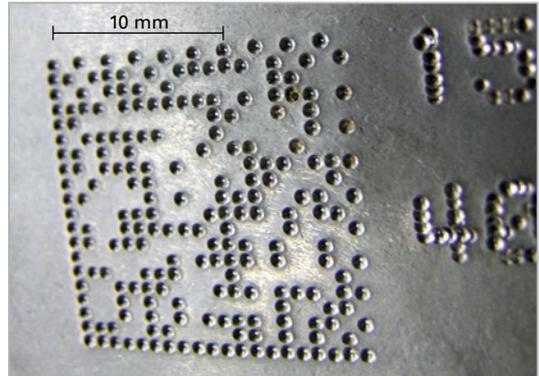


Bild 2: 2D-Code auf Gussteil geprägt



Bild 3: Embedded Systems zur Automatisierung

<sup>1</sup> engl. smart = geschickt

<sup>2</sup> RFID von engl. radio-frequency identification = drahtlose Identifizierung mithilfe elektromagnetischer Wellen

<sup>3</sup> engl. embedded = eingebettet

## 1.5 Cyber-Physische Systeme (CPS)

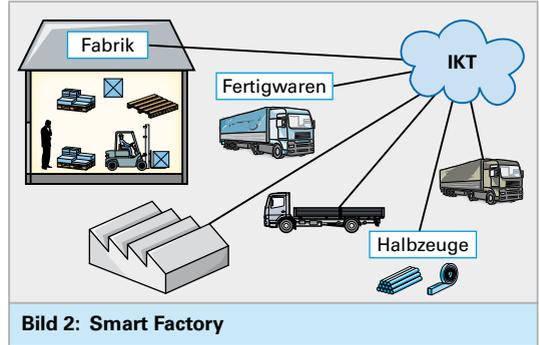
Eine zunehmende Bedeutung haben **Cyber-Physical-Systems<sup>1</sup> (CPS)**. Sie ermöglichen durch eine angehängte Kommunikationstechnik die Vernetzung von eingebetteten Systemen untereinander und mit dem Internet. Dabei wird die frühere hierarchische und lokal konzentrierte Struktur aufgelöst (**Bild 1**).

CPS sind die technologische Grundlage für Industrie 4.0. Die besondere Eigenschaft ist, dass CPS als *smart*, d. h. geschickt und intelligent, empfunden werden. So leiten sich daraus unmittelbar Produktnamen ab, wie z. B. *Smartphone* oder *Smart-TV* für internetfähige Mobiltelefone bzw. Fernsehgeräte.

Die Entwicklungen der Cyber-Physischen Systeme beschränken sich nicht nur auf Einzelprodukte, sondern gelten auch für Großsysteme wie z. B. **Smart Factory<sup>2</sup>**.

Dies ist eine Fabrik, deren Produktions- und Geschäftsprozesse durch Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) vernetzt sind (**Bild 2**).

Beim Thema *Smart Factory* liegen die Schwerpunkte auf intelligenten Produktionssystemen und -verfahren sowie auf der Realisierung verteilter und vernetzter Produktionsstätten. Unter der Überschrift *Smart Production* werden unter anderem die unternehmensübergreifende Produktionslogistik und die Mensch-Maschine-Interaktion in industriellen Anwendungen durch *Immersion<sup>3</sup>* (**Bild 3**) noch stärker in den Blick genommen.



**Bild 2: Smart Factory**

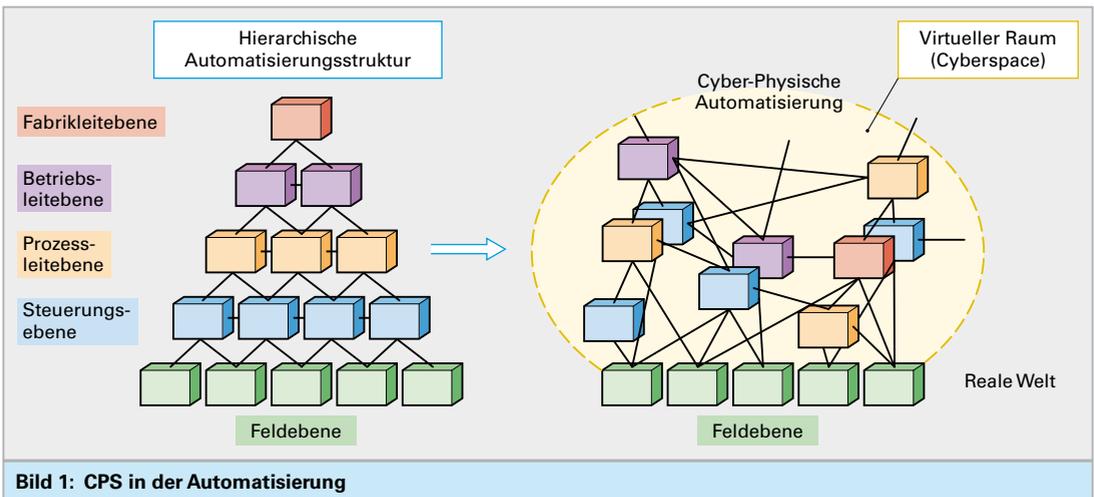


**Bild 3: Immersion in eine virtuelle 3D-Umgebung**

<sup>1</sup> cyber, altgriechische Vorsilbe für Steuerung... (des Seemanns) – ursprünglich die Steuerkunst des Seefahrers. Davon abgeleitet ist die Wissenschaft der Kybernetik = Regelungstechnik, Steuerungstechnik und Sensortechnik, heute meist in Verbindung mit Mikrocomputern, Mikroschaltkreisen und Mikromechanik.

<sup>2</sup> smart factory = intelligente (kluge) Fabrik

<sup>3</sup> engl. immersion = das Eintauchen



**Bild 1: CPS in der Automatisierung**

## 2 Spanende Werkzeugmaschinen

Kennzeichnend für spanende Werkzeugmaschinen ist die spanende Bauteilbearbeitung. Diese kommt durch die Relativbewegung zwischen einer Werkzeugschneide des Bearbeitungswerkzeugs und dem Bauteil bzw. Werkstück zustande (**Bild 1**). Die Relativbewegung wird durch den *Hauptantrieb und die Vorschubantriebe* erzeugt. Der Hauptantrieb kennzeichnet die Arbeitsleistung der Maschine und beträgt bei einem Dreh-Fräszentrum z. B. 20 kW.

weitgehend komplett bearbeitet werden können. Die Bauteile werden automatisiert zugeführt und rundum bearbeitet. Für Fräsen, Bohren, Drehen, Schleifen und weitere Verfahren stehen oft mehr als 100 Werkzeuge zur Verfügung. Bearbeitungszentren können aus Fräsmaschinen oder auch aus Drehmaschinen erwachsen (Bild 3).

### 2.1 Einteilung und Übersicht

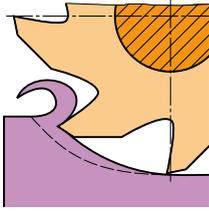
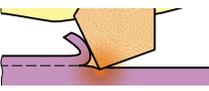
#### 2.1.1 Universelle Einzelmaschinen

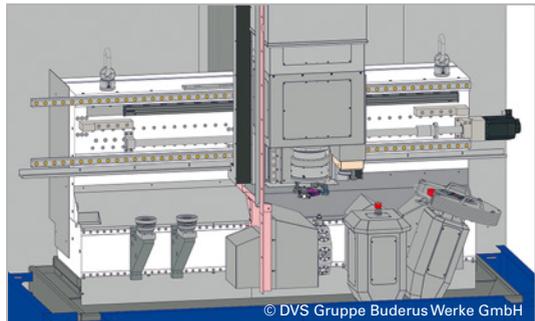
Die Einteilung der spanenden Werkzeugmaschinen kann man nach den Bearbeitungsverfahren (Normenreihe DIN 8589 [015-1]) vornehmen. So resultieren z. B. aus dem Verfahren des *Drehens* die **Drehmaschinen** und aus dem Verfahren des *Schleifens* die **Schleifmaschinen** (**Bild 2**).

Dabei werden die Verfahren nach Art der Schneiden in *geometrisch bestimmte* Schneiden und in *geometrisch unbestimmte* Schneiden weiter unterteilt (**Tabelle 1**). Die Art der Schneide hat durchaus einen Einfluss auf die Konstruktion und Bauart einer Maschine, z. B. auf die Schwingungsanregung durch wechselnden Zahneingriff oder hinsichtlich des Schutzes der Maschine vor Schleifstäuben.

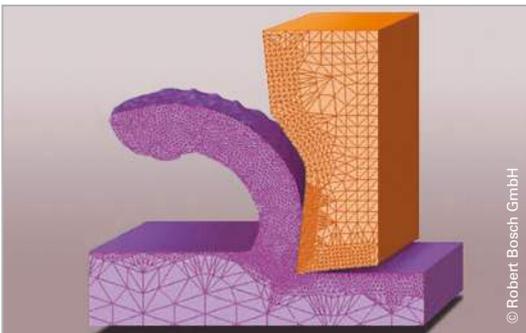
Die Maschinen eignen sich zur *universellen* Anwendung innerhalb ihrer Spezifikation. Neben den Universalmaschinen gibt es für einen stark eingeschränkten Aufgabenbereich auch aufgabenspezifisch konstruierte Bearbeitungszentren, z. B. zur Massenproduktion von Drehteilen.

**Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren:** Mit Bearbeitungszentren (**Bild 3**) fasst man mehrere Fertigungsverfahren in einer Maschine zusammen, sodass Werkstücke in *einer* Aufspannung

Tabelle 1: Die wichtigsten spanenden Fertigungsverfahren	
Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden	
	Drehen → Drehmaschine
	Bohren, Senken, Reiben → Bohrmachine
	Fräsen → Fräsmaschine
	Hobeln, Stoßen → Hobel-/Stoßmaschine
	Räumen → Räummaschine
	Sägen → Sägemaschine
Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden	
	Schleifen → Schleifmaschine
	Honen → Honmaschine
	Läppen → Läppmaschine



**Bild 2: Schleifmaschine (Hartbearbeitungszentrum)**



**Bild 1: Simulation der Spanbildung**

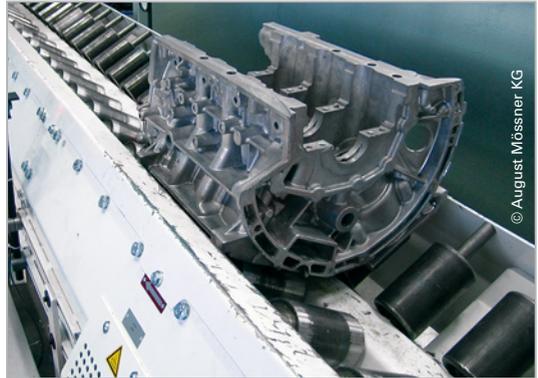


**Bild 3: Dreh-Fräszentrum**

### 2.1.2 Mehrmaschinensysteme

Mehrmaschinensysteme bestehen aus mehreren verbundenen Bearbeitungseinheiten oder aus mehreren verketteten Werkzeugmaschinen [016-1]. Mit der Verkettung von mehreren Maschinen erhöht man die Fertigungstiefe und/oder die Ausbringung. Universell einsetzbare (flexible) Mehrmaschinensysteme nennt man flexible Fertigungssysteme (FFS). Sie bestehen aus mehreren Bearbeitungszentren und ggf. Messmaschinen, Reinigungsmaschinen und Maschinen zur Wärmebehandlung. So unterscheidet man bei FFS:

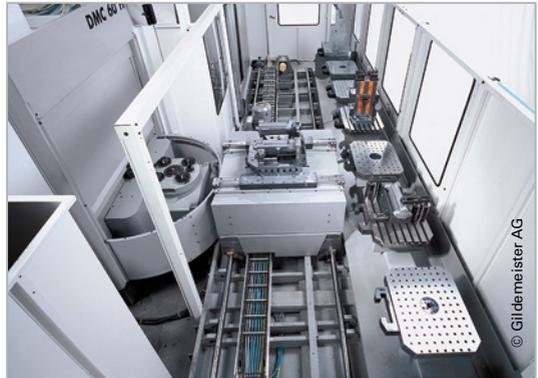
- Sich *ergänzende* Maschinen und
- Sich *ersetzende* Maschinen (**Bild 1**).



**Bild 2: Werkstücktransfer mit Rollenförderer**

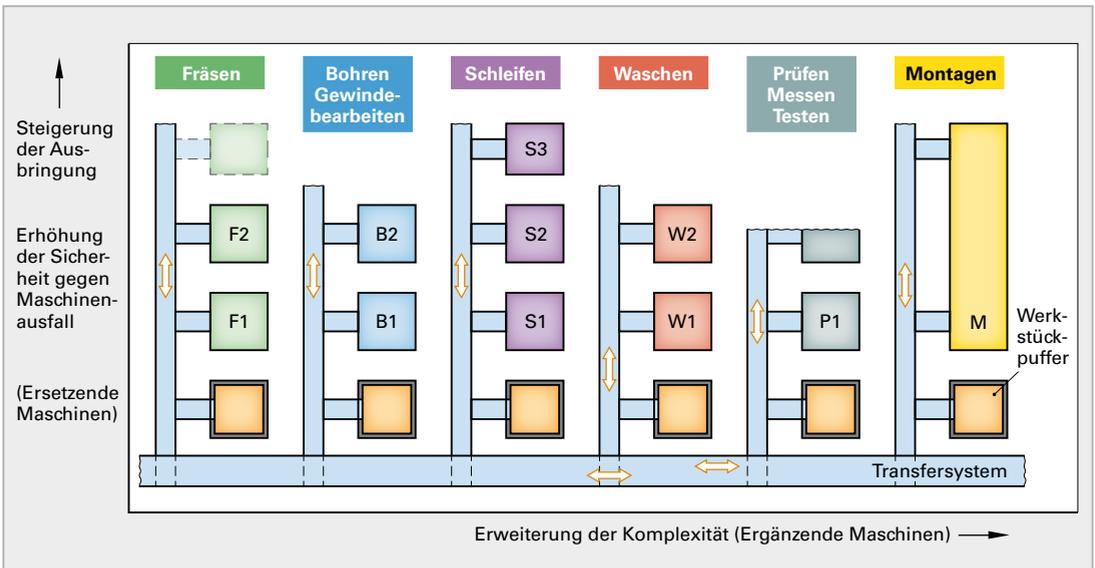
Die Verkettung mit sich ergänzenden Maschinen führt zu einer Erweiterung der Fertigungstiefe und zur erweiterten Fertigungsautomatisierung.

Die Verkettung mit *sich ersetzenden Maschinen*, also mit artgleichen Maschinen dient der Erweiterung der Produktionskapazität und der Erhöhung der Produktionssicherheit.



**Bild 3: Werkstücktransfer auf Paletten**

Durch Parallelarbeit der Maschinen wird die *Ausbringung* an Teilen erweitert. Im Falle von Servicearbeiten oder bei einem Maschinenausfall kann immer noch produziert werden. Die Verkettung erfolgt entweder durch einen Teiletransport, z. B. über Rollenförderer (**Bild 2**), oder bei Großteilen über einen Palettentransport mit aufgespannten Werkstücken (**Bild 3**).



**Bild 1: Flexibles Fertigungssystem mit sich ersetzenden und sich ergänzenden Stationen**

### 2.1.3 Unterscheidungsmerkmale

Bei den Werkzeugmaschinen der früheren Jahre konnte man den funktionalen Aufbau meist gut erkennen (**Bild 1**). Die Antriebseinheit, die Werkzeugspindel und die Bewegungseinheiten sind erkennbar.

Aufgrund erhöhter Sicherheitsvorkehrungen, erhöhter Geschwindigkeiten und zur Lärmminde- rung sind heutige Werkzeugmaschinen weitge- hend verkapselt. So werden die Funktionseinhei- ten kaum sichtbar.



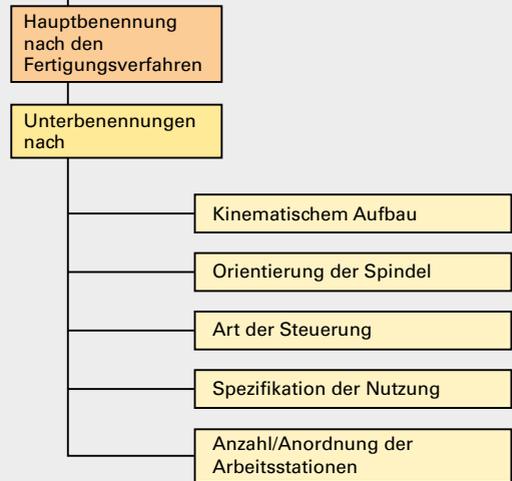
**Bild 1: Historische NC-Senkrecht-Fräsmaschine, um 1970 (Cincinnati 20 NC Hydro-Tel)**

Die Unterscheidungsmerkmale (**Bild 2**) und die da- raus folgenden Benennungen beziehen sich auf:

- das dominierende Fertigungsverfahren, z. B. *Drehmaschine* für das Drehen,
- den kinematischen Aufbau, nämlich die Art und die Abfolge der Maschinenachsen, z. B. *Portalfräsmaschine*,
- die Raumorientierung der Hauptspindel, z. B. *Senkrecht*drehmaschine,
- die Art der Steuerung: manuell, numerisch oder vollautomatisch, z. B. *Stangendrehautomat*,
- die Spezifikation in der Nutzung, z. B. *Kurbelwellenfräsmaschine*,
- die Anzahl der Arbeitsstellen, z. B. *6-Spindel*-Drehmaschine oder *12-Stationen*-Rundtaktmaschine.

Hinzu kommen Attribute wie z. B. *Groß...*, *Kompakt...*, *Präzisions...*, *Ultrapräzisions...*

#### Werkzeugmaschinenbenennung



**Bild 2: Benennungen der Werkzeugmaschinen**

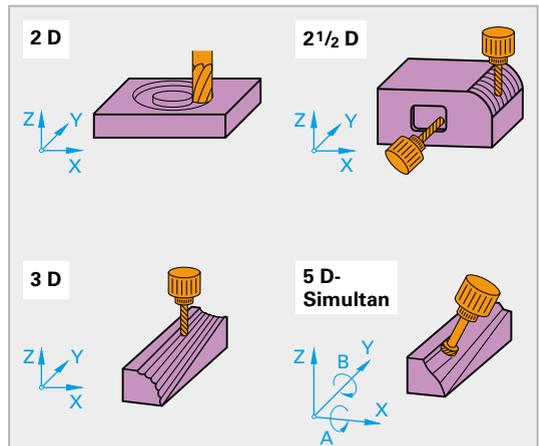
#### 2.1.3.1 Kinematik der Vorschubbewegung

Der Zerspanungsvorgang kommt durch die Relativbewegung eines Werkzeugs und eines Werkstücks zustande. Man unterscheidet dabei die Schnittbewegung durch den Hauptantrieb (Hauptspindel) und die Vorschubbewegung für den kontinuierlichen Materialabtrag und die Formbildung.

Die Vorschubbewegung wird meist aus mehreren Teilvorschubbewegungen zusammengesetzt und kann

- eine ebene geradlinige oder gekrümmte Bewegung sein (**2D-Steuerung**),
- eine ebene geradlinige oder gekrümmte Bewegung sein mit schrittweiser Zustellung senkrecht dazu (**2½D-Steuerung**),
- eine räumliche geradlinige oder gekrümmte Bewegung unter Beibehaltung der Werkzeugorientierung (**3D-Steuerung**), oder
- eine geradlinige oder gekrümmte Bewegung unter Veränderung der Werkzeugorientierung **5D-Steuerung**, **Bild 3**) sein.

Die vorschuberzeugenden Einheiten nennt man Maschinenachsen oder kurz Achsen.



**Bild 3: 2D-Steuerung bis 5D-Steuerung**

Man unterscheidet *translatorische Maschinenachsen* (X, Y, Z....) und *rotatorische Maschinenachsen* (A, B, C....). Die Maschinenachsen sind meist kartesisch in einem rechtsdrehenden Koordinatensystem angeordnet und werden nach **Bild 1** benannt, vgl. DIN 4000 -Teil 210, [018-1].

### Translatorische Achsen

Die **+Z-Achse** zeigt vom Werkstück zum Werkzeug und ist dabei parallel zur Hauptrotationsachse der Maschine. Die **+X-Achse** beschreibt die horizontal liegende Hauptachse in der Positionierebene. Bei vertikaler Z-Achse zeigt die +X-Achse nach rechts, bei Blickrichtung frontal auf die Maschine (Vorderansicht); bei horizontaler Z-Achse zeigt die +X-Achse nach rechts, bei Blickrichtung in die negative Z-Richtung; die **+Y-Achse** ergibt sich aus der „Rechte-Hand-Regel“.

### Rotatorische Achsen

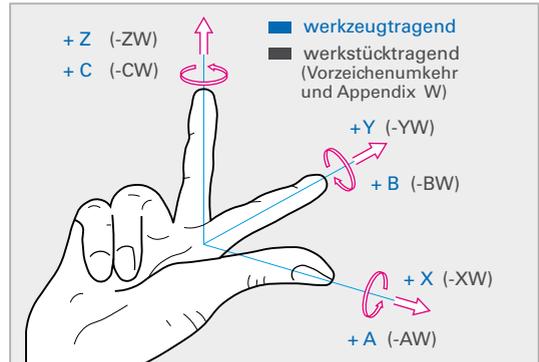
Die Bezeichnungen für rotatorische Achsen, z. B. Werkzeugschwenkachsen, werden mit den Buchstabensymbolen A, B, C ... bezeichnet und zwar +A bei rechtsdrehender Rotation um die +X-Achse, +B bei rechtsdrehender Rotation um die +Y-Achse und +C bei rechtsdrehender Rotation um +Z-Achse.

Die Bewegung in positiver Richtung einer Maschinenkomponente ist für die Teileprogrammierung so definiert, dass dabei eine wachsende positive Maßgröße am Werkstück entsteht.

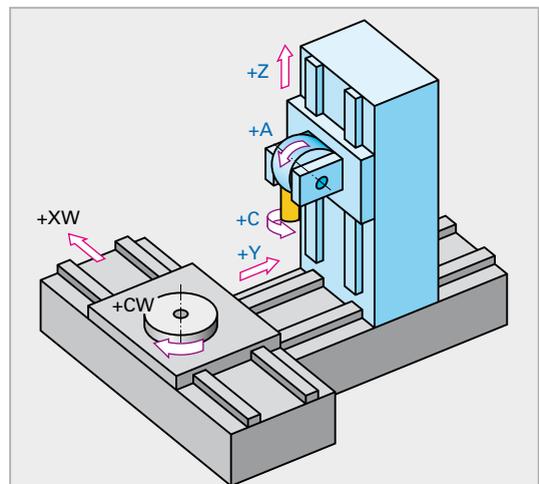
Wird also das Werkzeug bewegt, so entspricht die Achsrichtung der Bewegungsrichtung. Die Richtungspfeile entsprechen den Maßpfeilen am Werkstück und werden mit X, Y, Z bezeichnet. Wenn das Werkstück bewegt wird, sind die Bewegungsrichtung des Werkstücks und die Ausrichtung der Koordinatenachse entgegengesetzt. Zur Darstellung werden *werkstücktragende* Achsen mit einem angehängten „W“ dargestellt, wie beispielsweise +XW oder +ZW (früher mit Apostroph X'). Dabei gilt:  $-X \Rightarrow +XW$ . Ein Beispiel zeigt **Bild 2**. Mit U, V, W werden translatorische Werkzeug-/Werkstückwechslerachsen und mit D, E, F werden rotatorische benannt.

Sind funktionell weitere Achsen (Zusatzachsen) vorhanden, so kennzeichnet man diese mit einer fortlaufenden Zählnummer, z. B. +Z2 für eine zweite *werkzeugtragende* Achse in Z-Richtung (**Bild 3**).

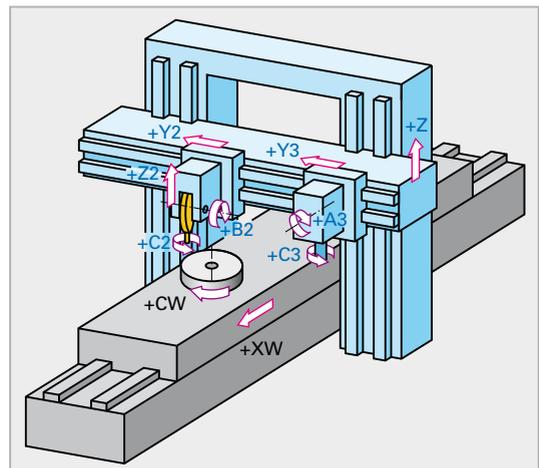
Für das Erscheinungsbild und die Art der Nutzung einer spanenden Werkzeugmaschine sind vor allem die *Anordnung* und die *Abfolge* der Maschinenachsen maßgeblich.



**Bild 1: Benennungen der Achsen (Rechte-Hand-Regel)**



**Bild 2: Vertikal-Fräsmaschine in Kreuzbettbauweise mit Werkzeugschwenkachse**



**Bild 3: Vertikal-Fräsmaschine in Tischbauweise mit zwei Spindeln**

### 2.1.4 Art und Anzahl der Achsen

**Drei Translationen.** Zum Erreichen eines **Positionspunktes** (Position) für das Werkzeug im Raum, dem Tool Center Point **TCP**, sind bei kartesischen Koordinaten X, Y, Z drei translatorische Achsen, nämlich je eine in X-Richtung, Y-Richtung und Z-Richtung erforderlich (**Bild 1, oben**). In manchen Fällen verwendet man für jede Achsrichtung je 2 Achsen: eine Hauptachse für die großen Fahrwege und großen Lasten und eine Hilfsachse, welche z. B. im Werkzeug verankert ist, um kleine schnelle Korrekturbewegungen oder ergänzende Bewegungen, z. B. beim Unrunddrehen von Zylindern, auszuführen (**Bild 1, unten**).

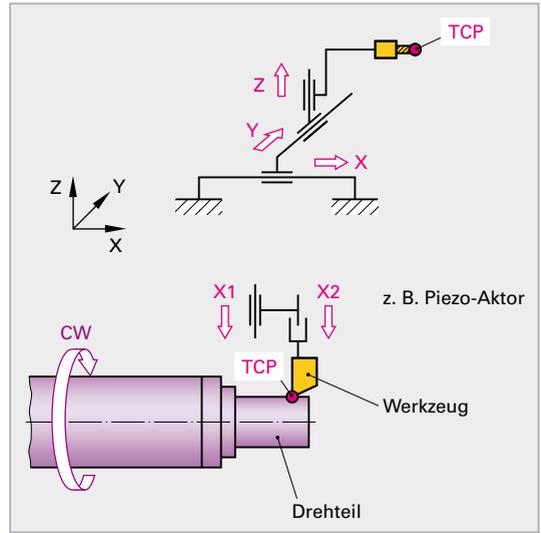
**Zwei Translationen, eine Rotation.** Verwendet man eine Anordnung mit einer rotatorischen Achse, so spannt man damit ein Zylinderkoordinatensystem mit der Höhenkoordinate Z, der Radiuskoordinate R und dem Winkel  $\phi$  auf. Der Steuerungsrechner macht die Koordinatentransformation zwischen Programmierkoordinaten X, Y, Z des TCP und den Bewegungskordinaten Z, R,  $\phi$  (**Bild 2, oben**).

**Eine Translation, zwei Rotationen.** Auch sind zur Positionierung Achssysteme mit Kugelkoordinaten möglich: Abstandskoordinate R, Polarwinkel  $\theta$  und Azimutwinkel  $\phi$  (**Bild 2, unten**). Man findet solche Systeme häufig als Achsgelenke bei Robotern.

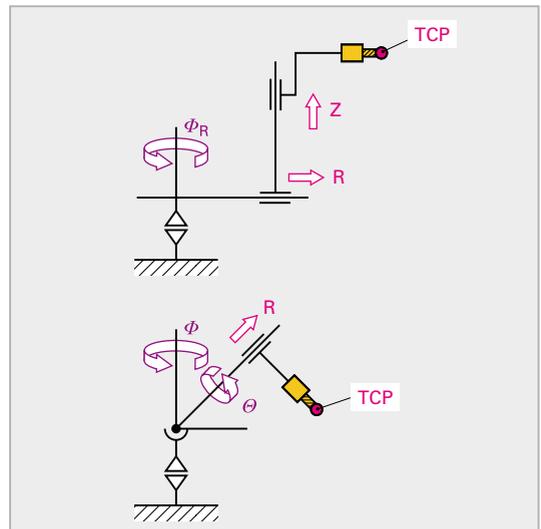
**Drei Translationen, drei Rotationen.** Im Allgemeinen sind für eine räumliche **Pose** sechs Koordinaten erforderlich, **drei Koordinaten der Position** und **drei Koordinaten der Orientierung**, entsprechend den 6 Freiheitsgraden der Bewegung (**Bild 3**). Letztere erreicht man im Regelfall mit rotatorischen Achsen, während erstere sowohl mit rotatorischen als auch translatorischen Achsen erzielbar sind. Roboter sind üblicherweise Geräte mit 6 Achsen.

**Drei Translationen, zwei Rotationen.** Verwendet man zur Werkstückbearbeitung ein rotationssymmetrisch wirkendes Werkzeug, z. B. einen Bohrer oder Fräser, so entfällt ein Orientierungswinkel, nämlich der, welcher in der Rotationsachse des Werkzeugs liegt. Bei Fräsmaschinen sind somit meist nur fünf Achsen als **5-Achsen-Fräsmaschine** zur Bewegungserzeugung auszubilden (wenn man also die Hauptspindel nicht zählt, vgl. Bild 2, vorhergehende Seite ).

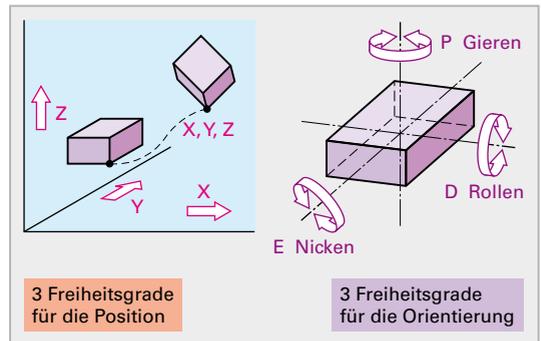
Zur allgemeinen Werkstückbearbeitung mit rotationssymmetrisch wirkendem Werkzeug sind fünf simultan steuerbare NC-Achsen erforderlich.



**Bild 1: Translatorische Achsen**



**Bild 2: Translatorische und rotatorische Achsen**



**Bild 3: Die sechs Freiheitsgrade der Bewegung**

Für die steuerungsinterne mathematische Koordinatendarstellung und Koordinatentransformation ist eine Abfolge der Winkel und der Winkelrichtungen notwendig. Häufig wird hierzu die Eulerkonvention<sup>1</sup>  $Z, Y', Z''$  verwendet (**Bild 1**): Der Winkel A beschreibt eine Drehung des Werkzeugs um eine zur Z-Achse parallele und durch den TCP verlaufende Achse. Es entsteht das gedrehte Koordinatensystem  $X', Y', Z'$ . Der Winkel B beschreibt nun eine Drehung des Werkzeugs um die jetzt vorhandene Achse  $Y'$ . Es entsteht das Koordinatensystem  $X'', Y'', Z''$ . Mit dem Drehwinkel C wird nun das Werkzeug um die vorhandene Achse  $Z''$  gedreht und es entsteht das Endkoordinatensystem  $X''', Y''', Z'''$  (siehe auch S. 459).

**Werkstücktragende Achsen und werkzeugtragende Achsen**

In der konventionellen Bauweise der Bewegungserzeugung bauen die Maschinenachsen aufeinander auf, z. B. trägt die X-Achse als 1. Achse (von der Bodenfesselung ausgehend) die Y-Achse und diese mit der Z-Achse das Werkzeug (**Bild 2, links**).

Man spricht von *serieller Kinematik*. Im **Bild 2, rechts** ist das 3-Achssystem ein *werkstücktragendes* System (W) mit den Achsen XW, YW, ZW. Bei einem 3-Achs-System wird aber meist aus vielerlei Gründen, z. B. wegen höherer Steifigkeit, der Bewegungsstrang in einen

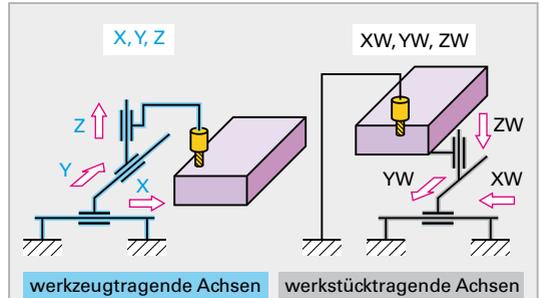
- *werkstücktragenden* und in einen
- *werkzeugtragenden* Strang aufgeteilt (**Bild 3**).

Die *werkzeugtragende* Z-Achse ist auch ortsgefeselt zu der *werkstücktragenden* XW-Achse. So hat man einen Mix zwischen nebeneinander arbeitenden *seriellen Achs-Systemen*.

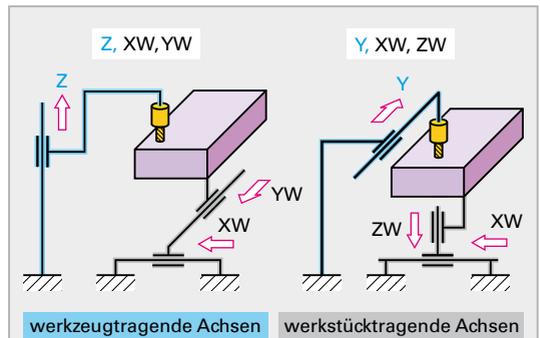
Das Konstrukt der Aufteilung in

- *werkstücktragende Achsen* und
- *werkzeugtragende Achsen*

erbringt neben einer weiteren Gestaltungsvielfalt (z. B. Zugänglichkeit, Spänefall) vor allem auch verbesserte Steifigkeiten.

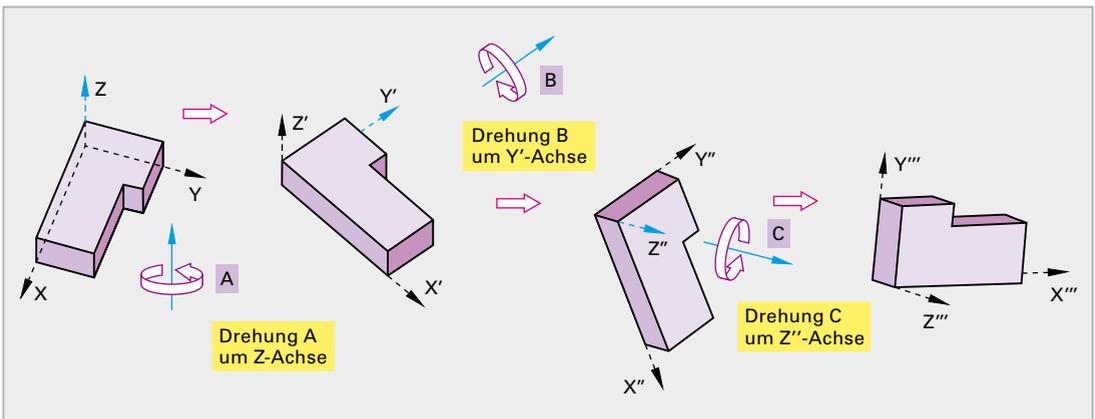


**Bild 2: Serielle Kinematik X, Y, Z (links) und XW, YW, ZW (rechts)**



**Bild 3: Serielle Kinematik Z, XW, YW und Y, XW, ZW**

<sup>1</sup> Leonhard Euler, Mathematiker (1707 bis 1783), lat. conventio = Übereinkunft



**Bild 1: Orientierungsdefinition nach der Eulerkonvention ZY'Z''**