

# Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung

Bearbeitet von  
Stefan Hesse, Viktorio Malisa

2., neu bearbeitete Auflage 2016. Taschenbuch. 614 S. Paperback

ISBN 978 3 446 44365 5

Format (B x L): 13 x 19,5 cm

Gewicht: 686 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Elektronik > Robotik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



Stefan Hesse, Viktorio Malisa

Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung

ISBN (Buch): 978-3-446-44365-5

ISBN (E-Book): 978-3-446-44549-9

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44365-5>

sowie im Buchhandel.

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1 Maschinennaher Materialfluss im Industriebetrieb</b>	13
1.1 Geschichtlicher Rückblick .....	13
1.2 Zeitleiste Industrieroboter (Auswahl) .....	18
1.3 Literatur- und Quellenverzeichnis .....	21
<b>2 Robotik – Technik für den Menschen</b> .....	23
2.1 Systematische Einordnung .....	24
2.2 Industrieroboter .....	27
2.2.1 Einführung und allgemeine Grundlagen .....	27
2.2.2 Begriffe und Definitionen .....	34
2.2.3 Leistungsmerkmale .....	42
2.2.4 Kinematische Grundbauarten und Arbeitsräume .....	49
2.3 Aktorik bei Industrierobotern .....	63
2.3.1 Pneumatische Aktoren .....	64
2.3.2 Hydraulische Aktoren .....	69
2.3.3 Elektrische Aktoren .....	70
2.3.4 Getriebe .....	89
2.4 Sensorik .....	97
2.4.1 Bedeutung von Sensoren .....	97
2.4.2 Positionssensoren .....	98
2.4.3 Kraftmessung .....	109
2.4.4 Trägheitssensorik .....	114
2.5 Endeffektoren .....	119
2.5.1 Aufgabe und Definition .....	119
2.5.2 Greifprinzip .....	125
2.5.3 Kraftübertragung bei mechanischen Greifern .....	129
2.5.4 Synchronisation der Greiferfinger .....	131
2.5.5 Greifbackenführung .....	133

---

2.5.6	Greifertypen .....	134
2.5.7	Greifgerechte Werkstückgestaltung .....	137
2.5.8	Greifkraft .....	138
2.5.9	Vakuumgreifer .....	142
2.5.10	Flexible Greiftechnik .....	152
2.5.11	Wechseleinrichtungen .....	156
2.5.12	Roboterwerkzeuge .....	158
2.6	Sicherheitstechnische Anforderungen .....	162
2.6.1	Allgemeine Grundlagen .....	162
2.6.2	Sicherheitsforderungen .....	163
2.6.3	Gesetzliche Regelungen .....	168
2.6.4	EN ISO 13849-1 Sicherheit von Maschinen .....	170
2.6.5	Sicherheitsausführungen .....	174
2.7	Steuerung von Industrierobotern .....	174
2.7.1	Bewegungssystem und Architektur .....	175
2.7.2	Bewegungsarten .....	181
2.7.3	Koordinatensysteme und Bezugspunkte .....	183
2.7.4	Analyse und Steuerung von Roboterbewegungen .....	189
2.7.5	Interpolation .....	210
2.7.6	Sensorführung .....	217
2.7.7	Betriebsarten .....	219
2.7.8	Einfluss von Temperaturschwankungen .....	221
2.8	Regelung von Roboterachsen .....	223
2.8.1	Positionsregelung .....	224
2.8.2	Digitale Regler .....	226
2.8.3	Lastadaptive Regelung .....	227
2.8.4	Regelung bei mobilen Robotern .....	229
2.8.5	Spezielle Regelungsansätze in der Robotik .....	230
2.8.6	Künstliche Intelligenz und Robotik .....	246
2.9	Programmierung von Industrierobotern .....	249
2.9.1	Programmiermethoden .....	250
2.9.2	Programmiersprachen .....	251
2.9.3	Fehlerbehebung .....	261
2.9.4	Programmierbeispiele .....	264
2.10	Simulation von Robotersystemen .....	269
2.10.1	Einbettung in die Digitale Fabrik .....	269
2.10.2	Simulationstechnik und -werkzeuge .....	271
2.10.3	Ablauf von Simulationsstudien .....	276
2.10.4	Methoden der Variantenbewertung .....	277

---

2.10.5	Entwerfen von Roboterzellen	278
2.10.6	Modellierung von Zellenkomponenten	281
2.10.7	Simulationsbeispiele und ihre Bewertung	283
2.11	Anwendungsbeispiele	290
2.11.1	Roboter als Bearbeitungsmaschine	290
2.11.2	Industrieroboterperipherie	293
2.11.3	Ausgewählte Roboteranlagen	299
2.12	Literatur- und Quellenverzeichnis	304
<b>3</b>	<b>Mensch-Roboter-Kooperation</b>	<b>309</b>
3.1	Manuell geführte Manipulatoren	309
3.1.1	Aufgaben und Lastenhandhabungsverordnung	309
3.1.2	Funktionen und Baugruppen	310
3.1.3	Antriebe	318
3.1.4	Gelenkbremmung	322
3.1.5	Standsicherheit von Säulengeräten	323
3.1.6	Greifer und Lastaufnahmemittel	325
3.2	Teleoperatoren	326
3.2.1	Definition und Arten	326
3.2.2	Möglichkeiten und Probleme der Fernhandhabung	328
3.2.3	Master-Slave-Manipulatoren	332
3.3	Assistenzroboter	335
3.3.1	Definition und Prinzip des Assistenzroboters	335
3.3.2	Anlagenkonzepte	336
3.3.3	Führung des Roboterarmes	337
3.4	Serviceroboter	343
3.4.1	Grundlagen	344
3.4.2	Aktuelle Einsatzfelder	346
3.4.3	Schlüsseltechnologien	354
3.5	Fahrerlose Flurförderzeuge	367
3.5.1	Fahrerlose Transportsysteme	367
3.5.2	Spurführungssysteme	368
3.5.3	Sicherheit	373
3.6	Autonome Mobile Roboter	376
3.6.1	Einteilung	379
3.6.2	Prinzipieller Aufbau	382
3.6.3	Kinematik	398
3.6.4	Odometrie	399

---

3.6.5	Lokalisation	399
3.6.6	Navigation	402
3.6.7	Entwicklungsbeispiel	404
3.7	Humanoide Roboter	406
3.7.1	Zeitleiste menschenähnliche Roboter (Auswahl)	406
3.7.2	Definition und Grundkonzepte	409
3.7.3	Null-Moment-Punkt	412
3.7.4	Gestik und Mimik	418
3.7.5	ICub	419
3.7.6	Ausblick	420
3.8	Mikrorobotik	421
3.8.1	Einführung	421
3.8.2	Grundaufbau	422
3.9	Literatur- und Quellenverzeichnis	437
<b>4</b>	<b>Handhabungstechnik</b>	<b>441</b>
4.1	Analytische Betrachtung der Werkstückhandhabung	441
4.1.1	Handhabungsfunktionen	441
4.1.2	Handhabungsobjekte	446
4.2	Handhabungsgerechte Werkstückgestaltung	449
4.3	Achskomponenten und Handlingmodule	452
4.3.1	Lineareinheiten und Führungen	453
4.3.2	Portaleinheiten	465
4.3.3	Dreheinheiten	467
4.3.4	Auslegung von Positionierachsen	473
4.4	Einrichtungen zum Ordnen	478
4.4.1	Ordnen von Massenteilen	478
4.4.2	Konstruktive Lösungen	481
4.4.3	Vibrationszuführtechnik	487
4.5	Einrichtungen für das Zuteilen	498
4.5.1	Zuteilen als Funktion	498
4.5.2	Konstruktive Lösungen	499
4.6	Einrichtungen zum Magazinieren	504
4.6.1	Magazinieren als Funktion	504
4.6.2	Bauformen von Magazinen	507
4.7	Objekthandhabung mit Strömungsmechanik	512

---

4.8	Zuführung von Schüttgut und Fluiden .....	517
4.8.1	Dosieren .....	517
4.8.2	Probleme beim Zuführen aus Bunkern .....	518
4.9	Einsatz bildverarbeitender Systeme .....	520
4.9.1	Grundkonzept .....	521
4.9.2	Bildverarbeitung .....	522
4.9.3	Anwendungsbeispiele .....	525
4.10	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	528
<b>5</b>	<b>Montageautomatisierung .....</b>	<b>529</b>
5.1	Montagevorgang und Bewegungsanforderungen .....	530
5.2	Methoden zur montagegerechten Konstruktion .....	534
5.3	Montagegerechtes Konstruieren .....	536
5.3.1	Produktbauweisen .....	537
5.3.2	Ausgewählte Gestaltungsregeln .....	541
5.4	Automatische Montagemaschinen .....	545
5.4.1	Montagelinie .....	547
5.4.2	Rundtaktautomaten .....	554
5.4.3	Montagezellen .....	558
5.4.4	Hybride Montagesysteme .....	561
5.4.5	Flexible Montageautomatisierung .....	563
5.5	Werkstückträger .....	564
5.6	Transfersysteme .....	568
5.7	Kontinuierliche Montage .....	578
5.8	Mikromontage .....	581
5.8.1	Montage von Mikrosystemen .....	581
5.8.2	Modellgesetze und Adhäsionseffekte .....	582
5.8.3	Werkzeuge zur Mikrohandhabung .....	585
5.8.4	Mikrohandhabungsprozesse und -strategien .....	590
5.9	Demontage .....	596
5.9.1	Demontagegerechte Gestaltung .....	597
5.9.2	Automatisierung der Demontage .....	602
5.10	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	604
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>607</b>

# Vorwort

Die Handhabung materieller Objekte ist für Arbeitsprozesse in der Montage, der Teilefertigung, im Lagerwesen oder beispielsweise beim Sortieren und Verpacken ein typischer Vorgang. Vieles davon wird heute bereits vom Industrieroboter automatisch erledigt. In Massenprozessen ist aber auch konventionelle Handhabungstechnik in unterschiedlichen Technisierungsvarianten unverändert oder weiterentwickelt im Einsatz. Inzwischen hat der technische Fortschritt auch mobile und autonome mobile Roboter hervorgebracht, die am Wirkungsort positionsflexibel sein können. Handgeführte Manipulatoren haben in der Lücke zwischen Roboter und Handarbeit ihren festen Platz. Durch kollaborierende Roboter entstehen Arbeitszellen, in welchen Intelligenz und Flexibilität des Menschen mit der Genauigkeit und Stärke eines Roboters in einem gemeinsamen Arbeitsraum ohne Schutzzaun wirken. Humanoide und Serviceroboter verlassen das Feld von Science-Fiction und wachsen in kleinen Schritten zu vielfältigen Helfern des Menschen. In der Montage steigt schließlich schnelles Manipulieren von Bauteilen zur „Hohen Schule“ der Handhabungstechnik auf, weil stets mehrere Teile zeitlich und räumlich punktgenau bewegt werden müssen. Das alles ist der fachliche Spannungsbogen dieses Taschenbuches.

Die wichtigsten Komponenten, Verfahren und Methoden werden im Buch erläutert und bildhaft vorgestellt. Der Umfang gebot, sich auf die wesentlichen Kernaussagen zu beschränken. Die Autoren waren bemüht, ein verständliches Nachschlagewerk zu schaffen. Es soll Studierenden technischer Fächer wie auch dem Praktiker im Beruf den Einstieg in die Thematik möglichst leicht machen.

Das Buch beruht auch in dieser 2. Auflage auf Teamarbeit. Deshalb sei allen Mitwirkenden gedankt, insbesondere den Mitgliedern vom Förderverein **F-AR** Wien, Frau Ute Eckardt und Frau Katrin Wulst vom Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag für die sachkundige Unterstützung und Betreuung. Inhaltlich hat eine Präzisierung und punktuelle Erweiterung stattgefunden.

Wien, im November 2015

Stefan Hesse  
Viktorio Malisa



# 3

## Mensch-Roboter-Kooperation

### ■ 3.1 Manuell geführte Manipulatoren

Handhabungseinrichtungen zur Mechanisierung von Hebe- und Umsetzungsvorgängen, die man auch als Balancer, Lastarmmanipulator oder Ausgleichsheber bezeichnet, setzt man seit etwa 50 Jahren vermehrt in Industrie, Handwerk und Bauwesen ein und entwickelt sie auch ständig weiter. Sie schließen die Technisierungslücke zwischen Roboter und Handarbeit.

**Balancer**(*manual manipulator*): Direkt handgesteuerter bzw. bewegter Manipulatorarm, bei dem eine anhängende Last im Moment der Lastaufnahme automatisch oder nach manueller Voreinstellung gegen die Schwerkraft in einen Schwebезustand versetzt wird. Der Balancer ist in seiner Bewegung nicht vorprogrammierbar.

#### 3.1.1 Aufgaben und Lastenhandhabungsverordnung

Industriegesellschaften unterliegen heute einem schnellen Wechsel in der Arbeitswelt. Viele körperlich schwere Arbeiten wurden inzwischen auf die Maschine (den Roboter) übertragen. Kleine Stückzahlen und komplizierte Bewegungsabläufe haben zur Entwicklung und zum Einsatz handgeführter Manipulatoren geführt. Ein wesentlicher Ansatzpunkt sind auch ergonomisch optimale Arbeitsbedingungen. Körperliche Überlastungen führen z. B. zu **Wirbelsäulenschäden** und manuelle Handhabung ist oft auch die Ursache für viele Verletzungen an Fingern und Extremitäten. Aus nicht bewältigten Anforderungen ergeben sich die in Tabelle 3.1 aufgezeigten Zusammenhänge [3.1].

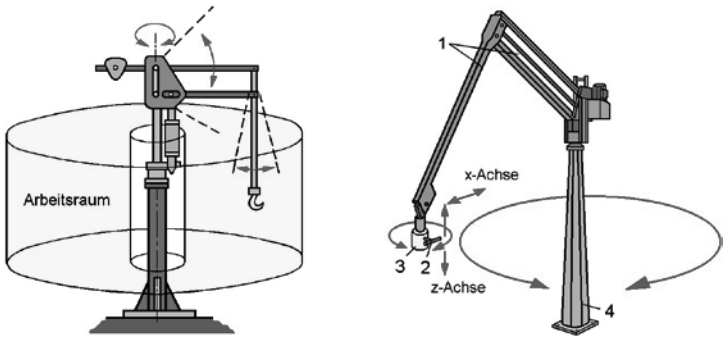
**Tabelle 3.1** Verschiedene Einflüsse haben negative Folgen auf den Werker.

Ursachen, Einflüsse		Wirkungen		Folgen
<b>physische Belastung</b>		Beschwerden	}	Fehlzeiten
- Handhaben von Lasten		Beeinträchtigungen		Fluktuation
- Vibrationen		Schädigungen	}	Leistungs- mangel
- Körperhaltung und -bewegung				Qualität
- muskuläre Aktivierung		Sicherheit		
<b>psychosoziale Belastung</b>				

Die zumutbare Last für manuelles Heben und Tragen ist für Männer und Frauen unterschiedlich und sie hängt auch von der Häufigkeit des Handhabens je Zeiteinheit ab. Deshalb wurde 1996 die „Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei manueller Handhabung von Lasten bei der Arbeit“ erlassen [3.2; 3.3]. Danach muss der Arbeitgeber dafür Sorge tragen, dass die Mitarbeiter möglichst keine schweren Lasten von Hand bewegen müssen, sondern technische Hilfen wie z. B. den Manipulator einsetzen. Ein ergonomisch gestalteter Arbeitsplatz ist somit in den Ländern der EU einklagbar.

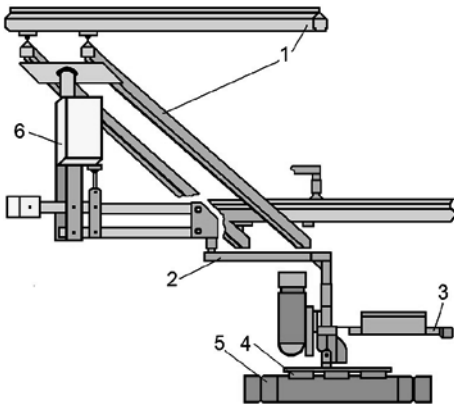
### 3.1.2 Funktionen und Baugruppen

Es gibt viele Ausführungen, die mehr oder weniger bestimmten Anwendungen angepasst sind. Die Verwendung betrifft das Heben, Umsetzen von Lasten, Verpacken und Montieren bei gleichzeitiger Senkung des Krankenstandes und von Verletzungen im Bereich der Extremitäten. Die Hauptbestandteile eines Manipulators sind Kinematik (Arm, Gelenke, Führungen), Endeffektor (Lastaufnahmemittel, Greifer), Gleichgewichtssteuerung, Hand- und Fahrachsenantriebe sowie Sensoren (Wägezellen). Eine übliche Bauform ist der Standsäulenmanipulator (Bild 3.1).



**Bild 3.1** Stufenlose Bewegungsmöglichkeiten beim manuell geführten Standsäulenmanipulator. 1 Armgestänge, 2 Bediengriff, 3 Anschluss für Endeffektor, 4 Standsäule mit vertikaler Drehgelenkachse

Weitere Bauformen sind maschinenintegrierte Balancer (selten), die z. B. an Werkzeugmaschinen für das Handhaben schwerer Maschinenwerkzeuge und Werkstücke eingesetzt werden können. Wegen des sich ergebenden großen Arbeitsraumes sind Fahrständermanipulatoren oder Manipulatoren, die an einem  $x$ - $y$ -Deckenlaufwerk fahren, besonders vorteilhaft einsetzbar. Das Bild 3.2 zeigt ausschnittsweise ein solches Handhabungsgerät.



**Bild 3.2**  
 Deckenverfahrbarer Manipulator.  
 1 Leichtlaufschiene,  
 2 Auslegergelenkarm,  
 3 Führungs- und Steuergriff,  
 4 Saugergreifer,  
 5 Greifobjekt,  
 6 Gewichtskraftausgleich

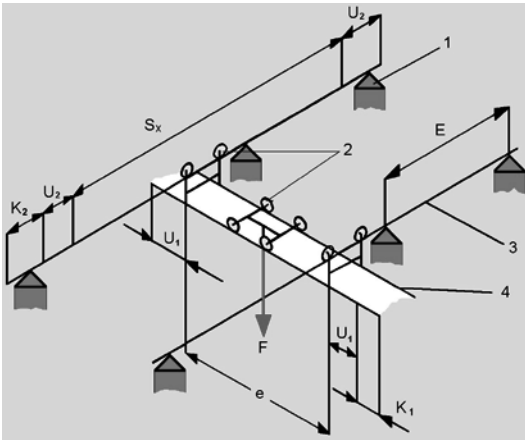
Für diese Ausführung soll an einem Beispiel die Auswahl der Deckenlaufschienen gezeigt werden. Der Hubarm soll an einer **Zweitträgerbrücke** befestigt und flächenverfahrbar sein. Das Bild 3.3 zeigt den Systemaufbau.

### Ausgangsdaten für das Beispiel

Hubmasse (Last)	$F_1 = 250 \text{ kg}$
Eigenmasse des Hubarmes	$F_2 = 42 \text{ kg}$
Eigenmasse Fahrwerkträger mit Fahrwerk	$F_3 = 38 \text{ kg}$

Damit wird die Belastung  $F$  des Systems auf einer Schienenseite nach (3.1):

$$F = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{2} = \frac{250 + 42 + 38}{2} = 165 \text{ kg} \quad (3.1)$$



**Bild 3.3** Portalfahrwerk mit Zweitträgerbrücke. 1 Stütze, Auflager, 2 Fahrwerk, 3 Längsweg-Schiene, 4 Zweitträgerbrücke, Lastangriff mittig

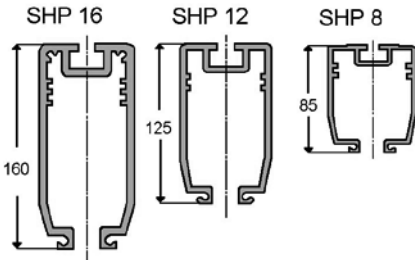
Weitere Vorgaben betreffen den Arbeitsraum

Querfahrweg	$S_y = 3000 \text{ mm}$
Überstand an der Querschiene	$U_1 = 210 \text{ mm}$
Zusatzlänge für Kabelwagen (Schleppkabel)	$K_1 = 170 \text{ mm}$
Spurmittenabstand ( $e = S_y + 550$ )	$e = 3550 \text{ mm}$

Damit wird die benötigte Querschienenlänge  $L_1$ :

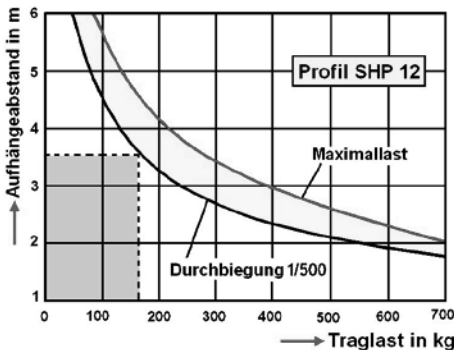
$$L_1 = e + 2 \cdot U_1 + K_1 = 3550 + 2 \cdot 210 + 170 = 4140 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Welches **Querschienenprofil** muss man nun auswählen? Die verfügbaren Profile werden in Bild 3.4 vorgestellt. Es gibt Aluminium- und Stahlprofilsschienen mit unterschiedlichen Abmessungen.



**Bild 3.4**  
Laufschieneprofile aus stranggepresstem Aluminium

Die Auswahl geschieht nach der zulässigen Durchbiegung der Schiene unter Volllast. Wird sie überschritten, dann ist kein **Leichtlauf** der Laufwagenrollen mehr gewährleistet. Bei einem Abstand der Aufhängepunkte von 3550 mm ergibt sich bei einer Belastung von 165 kg gemäß Diagramm Bild 3.5 (Angaben des Schienenherstellers) das Profil SHP 12.



**Bild 3.5**  
Fahrchienebelastbarkeit des Profils SHP 12 (Aluminium-Strangpressprofil)

Die im Bild genannte Durchbiegung von 1/500 mm bedeutet, dass sich die Durchbiegung im Verhältnis zur Länge  $L$  (Abstand der Aufhängepunkte) wie 1:500 verhält. Das heißt:

$$f_{\max} = L \cdot \frac{1}{500} \quad (3.3)$$

In das Diagramm wurde die Eigenmasse der Schiene bereits eingearbeitet. Welche Masse  $F_4$  ergibt sich für eine Querschiene? Die Masse je Meter Fahrschiene beträgt  $M = 5,1$  kg/m und die Eigenmasse für ein Fahrwerk  $F_5 = 1,7$  kg. Damit ergibt sich:

$$F_4 = L_1 \cdot M + F_5 \cdot 2 = 4,14 \cdot 5,1 + 1,7 \cdot 2 = 24.5 \text{ kg} \quad (3.4)$$

Im nächsten Schritt ist der Aufhängeabstand der Längswegschienen zu bestimmen. Die Belastung  $F_6$  einer Längsschiene ergibt sich bei einer Zweiträgerbrücke (Berechnung als Punktlast, ungünstigste Stellung des Laufwagens) zu:

$$F_6 = 2 \cdot F + F_4 = 2 \cdot 165 + 25 = 355 \text{ kg} \quad (3.5)$$

Die Berechnung der Länge  $L_2$  der Längswegschienen berücksichtigt

- Überstand der Längswegschiene  $U_2 = 595$  mm
- Zusatzlänge der Kabelwagen auf der Längsschiene  $K_2 = 425$  mm
- Längsfahrweg  $S_x = 8000$  mm

Die Angaben sind Erfahrungswerte bzw. Werte aus den Datenblättern der Schleppkabelhersteller. Damit wird nun

$$L_2 = S_x + 2 \cdot U_2 + K_2 = 8000 + 2 \cdot 595 + 425 = 9615 \text{ mm} \quad (3.6)$$

Bei einer Traglast von 355 kg erhält man einen Abstand der Aufhängepunkte von etwa 3800 mm. Man bestimmt nun die Profilgröße wiederum an Hand vorgegebener Diagramme und erhält als Profil die Baugröße SHP 16.

Die nächste Fragestellung wäre, wie viele Aufhänge- bzw. **Schienenstützpunkte**  $n$  sind für die Längswegschienen zu planen? Bei einem zulässigen Abstand von  $E_1 = 3800$  mm ergibt sich  $n$  zu

$$n = \frac{S_x + 2 \cdot U_2}{E_1} + 1 = \frac{8000 + 2 \cdot 595}{3800} + 1 = 3,4 \quad (3.7)$$

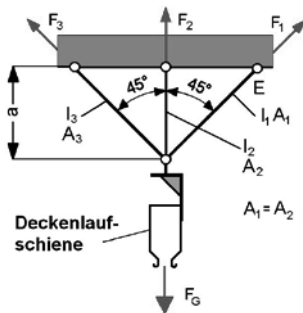
Gewählt werden vier Stützpunkte.

Zuletzt wäre zu prüfen, ob die Deckenanbindung die maximale Traglast auch aushält. Im Beispiel soll eine V-Aufhängung der Schiene mit drei Zugstäben ausgewählt werden (Bild 3.6). Für die Bemessung der Stabanbindung ist zu klären, wie groß die Stabkräfte  $F_1$ ,  $F_2$  und  $F_3$  sind.

Gegeben sind die Stabquerschnitte  $A_1 = A_3$  und  $A_2$ ; der Elastizitätsmodul  $E$  und der Abstand  $a$  sowie der Anlenkwinkel  $45^\circ$ . Geht man davon aus, dass die Belastung durch ein Deckenfahrwerk mit  $F_G$  gegeben ist, so lassen sich (nach GÖLDNER) folgende Beziehungen angeben, wenn sich die Summe aller vertikalen Kräfte im Gleichgewicht befindet. Es gilt:

$$\uparrow F_1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F_2 + F_3 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - F_G = 0 \quad (3.8)$$

Für die Bestimmung der unbekanntenen **Stabkräfte**  $F_S$  reicht diese Gleichgewichtsbedingung nicht aus. Es ist ein statisch unbestimmtes Problem.



**Bild 3.6**

Anbindung einer Laufschiene an das Bauwerk mit einer V-Aufhängung über drei Zugstäbe

Man muss noch die bekannten Formänderungen der Zugstäbe einbeziehen, um aus den elastischen Formänderungen auf die ursächlichen Kräfte schließen zu können. Es kommt in den Stäben zu folgenden Formänderungen (Dehnungen  $\varepsilon$ , Zugfestigkeit des Werkstoffes  $\sigma$ ):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F_s}{E \cdot A} \quad (3.9)$$

Weil alle Stäbe am Lastaufhängepunkt verbunden sind, ergibt sich für die Längenänderung unter Last

$$\Delta l_2 = \Delta l_3 \cdot \sqrt{2} = \Delta l_1 \cdot \sqrt{2} \tag{3.10}$$

Jetzt werden die folgenden **Stabdehnungen**  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  und  $\varepsilon_3$  nach  $\Delta l$  umgestellt und in (3.10) eingesetzt:

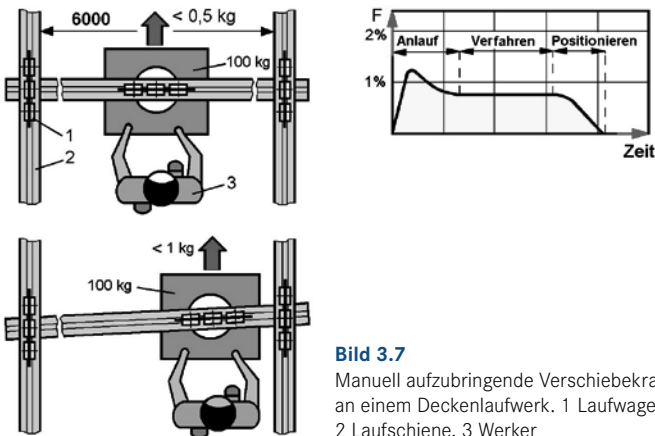
$$\varepsilon_1 = \frac{F_1}{E \cdot A_1} = \frac{\Delta l_1}{a \cdot \sqrt{2}}; \varepsilon_2 = \frac{F_2}{E \cdot A_2} = \frac{\Delta l_2}{a};$$

$$\varepsilon_3 = \frac{F_3}{E \cdot A_3} = \frac{\Delta l_3}{a \cdot \sqrt{2}} \tag{3.11}$$

Gleichgesetzt und in die Gleichung (3.8) für die Senkrechtkräfte eingesetzt erhält man nun

$$F_1 = F_3 = \frac{F_G}{\sqrt{2} + 2 \cdot \frac{A_2}{A_{1,3}}}; \quad F_2 = \frac{2 \cdot A_2 \cdot F_G}{\left(\sqrt{2} + 2 \cdot \frac{A_2}{A_{1,3}}\right) \cdot A_{1,3}} \tag{3.12}$$

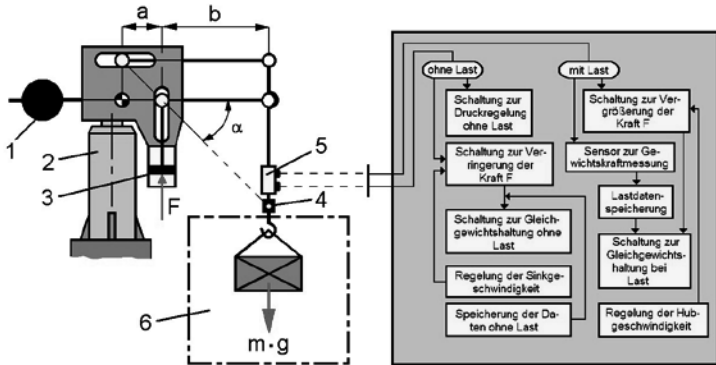
Die Einhaltung der Durchbiegungsgrenzen bei den Laufschienen sichert eine nur kleine Verschiebekraft  $F$  in  $x$ - $y$ -Richtung. Sie beträgt etwa 1 % der anhängenden Last. Mittiger Kraftangriff ist beim Schieben besser als eine seitliche **Schiebekraft**, wie in Bild 3.7 dargestellt.



**Bild 3.7**  
Manuell aufzubringende Verschiebekraft  $F$  an einem Deckenlaufwerk. 1 Laufwagen, 2 Laufschiene, 3 Werker



Das Verschieben in der  $x$ - $y$ -Ebene wird mit Handkraft vorgenommen, während die Hebelbelastung automatisch gegen die Schwerkraft ausbalanciert wird. Das Bild 3.8 zeigt das Blockschaltbild einer **Laststeuerung**.



**Bild 3.8** Lastbalancesteuerung bei einem manuell geführten Manipulator.

1 Masseausgleich, 2 Standssäule, 3 Druckluftzylinder, 4 Lastführung, 5 Kraftsensor, 6 Arbeitsraumquerschnitt

Dazu ist im Kraftfluss ein Sensor (Wägezelle) erforderlich, um die Gewichtskraft zu ermitteln. Im Beispiel wird die Schwerkraft kompensierende Kraft von einem Pneumatikzylinder aufgebracht.

Für das automatische Ausbalancieren der Last (Lasterkennungssteuerung) ist eine **Wägezelle** im Kraftfluss erforderlich. Nach dem Wiegeergebnis wird der Gewichtskraftausgleich berechnet. Ein Ausführungsbeispiel für den Sensor wird in Bild 3.9 vorgestellt. Üblicherweise werden Dehnungen und Stauchungen gemessen, die an einem **Verformungskörper** entstehen. Die entsprechenden Stellen werden dazu mit Dehnmessstreifen ausgerüstet. Unter Last wird der obere Dehnmessstreifen gedehnt, der untere dagegen gestaucht. Es gibt noch viele andere geometrische Formen für die Gestaltung von Verformungskörpern.

# Sachwortverzeichnis

## A

ABC-Analyse 536  
Abrissroboter 349  
Absolutwertgeber 99  
Abstandssensor 392  
Achspeditionen 191  
Agent 248  
AGV 368, 370  
Allseitenrad 384  
Android 411  
Anströmparadoxon 515  
Anströmverhalten 482  
Antistatigurt 571  
Antrieb, holonomer 387  
Arbeitsraum 49  
Assistenzroboter 335  
Asynchronmaschine 85  
Auflicht-Beleuchtungssystem 522  
Auslegerachse 473  
Automation 13  
Automatisierungsgrad 37

## B

Bahnsteuerung 176, 182  
Bahnverschleifen 215  
Balancer 309  
Balgzylinder 64  
Barrett-Hand 153  
Baukastenbauweise 538  
Bauteilezuführung 492  
Bayer-Filter 521  
Bearbeitungsroboter 290  
Beleuchtungsarten 522  
Bernoulli, Satz von 515  
Beschickungsarm 465

Beschickungseinrichtung 506  
Beschleunigungssensor 114  
Beugefinger 124  
Bewegungsarten 181  
Bildererkennung 485  
Bildverarbeitung 521  
Bonden 595  
Brückenbildung 519  
Brückenschaltung 105, 112  
Bunkerzuführeinrichtung 445  
Bypass 569

## C

CAD-System 282  
Camcopter 381  
Care-O-bot 363  
CMOS-Sensor 394  
Cobot 335  
Cyclo-Getriebe 94

## D

Datenanzug 334  
Deckenanbindung 315  
Deckenfahrwerk 338  
Dehnmessstreifen 112  
Demontage 597  
Demontagestrategie 602  
Demontagezelle 603  
Demontieren 530  
Denavit-Hartenberg-Notation 204  
DH-Konvention 205  
DH-Notation 204  
Differenzialgetriebe 96  
Differenzialtransformator 101

Digitale Fabrik 270  
Direktantrieb, elektrischer 476, 575  
DMS-Wägezelle 318  
Doppelarm 466  
Doppeldrehtisch 297  
Doppelgreifer 62, 188  
Doppelgurt-Transfersystem 548  
Doppelkolbensystem 470  
Doppelspannplatz 299  
Doppelstation 550  
Doppelwinkelhand 60  
Doppler-Effekt 393  
Dosieren 517  
Drehantrieb 468  
Drehgelenkroboter 176  
Drehmomentausgleich 52  
Drehmomentmotor 556  
Drehtisch 297  
Dreh-Wende-Positionierer 297  
Dreiphasenbrücke 81  
Drohne 381  
Druckluftmotor 65, 320  
Dünnringlager 469  
Durchlaufmagazin 508  
Durchlichtsystem 527  
Durchlichtverfahren 486

**E**

Effekt, aerodynamischer 515  
Effektorführungsgetriebe 223  
Effektor-Orientierung 197  
Einschienen-Transfersystem 573  
Einstrahl-Interferometer 109  
Ejektor 143  
Elementarfunktionen 442  
Encoder 391  
Endeffektor 30, 61, 119, 177, 185,  
189, 209  
Entgratewerkzeug 161  
Entwirrgerät 447  
Euler-Notation 198  
Exoskelett 333

**F**

Fabrikautomation 38  
Fahrbalken 466  
Fahrtrichtungssensor 391  
Fahrwerkkonstruktionen 380  
Faltenbalsauger 145  
Fangzaun 296  
Fassadenreinigungsroboter 360  
Feder-Masse-System 487  
Fehlerbehandlung 262  
Fehlermeldungen 263  
Fehlerrate 37  
Ferngreifer 327  
Fernhandhabung 328  
Field Robots 346  
Fingerkinematik, selbstadaptive 155  
Fingermaster 331  
Fingerselbstverstellung 133  
Fischflosseneffekt 155  
Flächenportal 467  
Fluidantrieb 470  
Formgedächtnislegierung 587  
Formgriff 61  
Formschlussbauweise 540  
Fortbewegungsarten 385  
Fortbewegungssysteme 383  
Framedarstellung 196  
Freiheitsgrad 29  
Führungsgetriebe 54  
Füllungskoeffizient 483  
Funktionsablaufplan 551  
Fußgelenk 417

**G**

Gefahrenquellen 374  
Gefriergreifer 589  
Gehroboter 417  
Gelenkarten 30  
Gelenkbremmung 322  
Genauigkeit 57  
Genauigkeitsmaß 57  
Geschwindigkeitsverschleifen 215

Gesichtsroboter 418  
 Gestaltung  
 - demontagegerechte 597  
 - greifgerechte 137  
 Gestaltungseffektivität 535  
 Gierachse 198  
 Gleichstrommotor 70, 74  
 Globoidschneckengetriebe 555  
 Graycode 99  
 Greifbarkeit 63, 120  
 Greifer 119, 325  
 - elektrostatischer 128  
 Greiferauswahl 141 f.  
 Greiferbahnhof 158  
 Greiferkoordinatensystem 121  
 Greifertypen 134  
 Greiferwechselsystem 157  
 Greiffläche 121  
 Greifhand 121  
 Greifkraft 138  
 Greifkraftkennlinie 130  
 Greifkraftverlauf 130  
 Greifprinzip 125  
 Greifsituationen 139  
 Greifsystem 122  
 Greifwegkennlinie 130  
 Griff  
 - formschlüssiger 125  
 - kraftschlüssiger 125  
 Grifffläche 122  
 Griff in die Kiste 496  
 Grundachsen 33  
 Gynoid 411  
 Gyroskop 115, 391

## H

Haft-Gleit-Effekt 432  
 Haftgreifer 61  
 Hakengreifer 137  
 Hallsensor 80  
 Handdrehachse 325  
 Handhabeadapter 63  
 Handhabungsobjekte 446

Handhabungsroboter 371  
 Handhabungstechnik 41  
 Handkonfiguration 51  
 Harmonic-Drive-Getriebe 95  
 Haufwerk 16, 480  
 Hauptachsen 31  
 Haushaltsassistent 363  
 Haushaltsrobotik 354  
 HD-Getriebe 95  
 Heuteile 447  
 Hubachse 459  
 Hubsauger 144  
 Hubschlauch 319  
 Hüllkörpermodell 15  
 Humanoid 23, 385, 406  
 Hydraulikaktor 69

## I

Immersion 329  
 Inchworm-Motor 434  
 Inchworm-Roboter 433  
 Industrie 4.0 17  
 Industrieroboter 14, 18, 27, 29  
 - werkstückführender 291  
 Industrieroboterperipherie 294  
 Informationsroboter 373  
 Inkrementalgeber 98  
 Innengreifer 136  
 Inspektion, teleoperierte 348  
 Integrationsgrad 39  
 Intelligenz, künstliche 246  
 Interaktion 23  
 Interpolationsarten 211  
 Intralogistik 563

## J

Justieren 530

**K**

Kalman-Filter 402  
Karree-Umlauf 548  
Karussellmagazin 511  
Kaskadenregelung 226  
Kegelradgetriebe 93  
Kenngrößen 42  
Kinematik, inverse 209  
Kleinstteilegreifer 589  
Klemmgreifer 129  
Klemmgriff 61  
Kletterroboter 360  
Knickarmroboter 52  
Kollisionstest 275  
Kompass 104  
Konstruieren, montagegerechtes  
537  
Konturbild 527  
Koordinatenachsen 183  
Kraftmessung 110  
Kraft-Positionsregelung 228  
Kraftregelung 594  
Kraftsensor 593  
Kraftübertragungsmittel 318  
Kreiselnsensor 117  
Kreisinterpolation 211  
Kunstmensch 406  
Kurvenschrittgetriebe 555

**L**

Ladehilfsmittel 300  
Laserlaufzeit-Entfernungsmessung  
106  
Lasermodulation 107  
Laserstrahlführung 373  
Lastaufnahme 325  
Lastaufnahmemittel 325  
Lastbalancesteuerung 317  
Lasthaftgerät 325  
Lastkenngrößen 45  
Laufroboter 413  
Laufwagen 474

Laufzeitmessung 372  
Leistungssensor 217  
Leitliniensystem 369  
Lernalgorithmus 241  
Linearachse 456  
Linearinterpolation 211  
Linearmotor 88  
Linearschwingrinne 489  
Linienmontagesystem 548  
Linienportalroboter 465  
Lokalisation 400  
Lokomotion 383  
Lorentzkraft 71

**M**

Magazinbauform 507  
Magazine 506  
Magazinieren 505  
Magnetfeldsensor 104  
Main-Routine 264  
Malteserkreuzgetriebe 555  
Massedosierung 517  
Master-Slave-Manipulator 327  
Mecanum-Rad 387  
Mechatronik 24  
Medizinroboter 350  
Mehrgelenkfinger 135  
Mehrrichtungskette 574  
Mehrstufigejektor 143  
Melkroboter 347  
Mikrogreifer 586  
Mikrohandhabungsstation 590  
Mikromanipulation 595  
Mikroroboter 422, 592  
Mikroroboterantrieb 434  
Mikrorobotik 128  
Mittelpunktverlagerung 133  
Mobilrobotik 373  
Modell, kinematisches 281  
Montage, kontinuierliche 578  
Montagelinie 547  
Montagetransfersystem 571  
Montagezelle 559

Montieren 42, 530  
 MP-Steuerung 181  
 Muskel, pneumatischer 65

## N

Nachlaufregelung 342  
 Nahtverfolgung 217  
 Navigation 402  
 Nebenachsen 31  
 Nennlast 45  
 Nestbauweise 539  
 Nickachse 198  
 Not-Aus-Schalter 167  
 Null-Moment-Punkt 412  
 Nutzlastverteilung 56  
 Nutzwertanalyse 277

## O

Oberflächeninspektion 525  
 Odometrie 399  
 Offline-Programmierung 49  
 Ordnen 478  
 Ordnungshilfen 492  
 Ordnungswahrscheinlichkeit 489  
 Ordnungszustand 449  
 Orientierungsgrad 449  
 Orientierungsinterpolation 214  
 Ortungssensor 392  
 OTS 335  
 Ovalsauger 145  
 Override 220

## P

Palettenhandhabung 297  
 Palettierroboter 302  
 Parallelkinematik 18  
 Parallelmanipulator 327  
 Parallelroboter 53  
 Passivachse 475  
 Pendelarmroboter 55

Pendelform 216  
 Peripherie 298  
 Pfadplanung 402  
 Planarroboter 231  
 Planetengetriebe 90  
 Platooning 405  
 Plattform, kletternde 359  
 Plausibilitätsprüfung 376  
 Playback-Programmierung 48  
 Pneumatikantrieb 64  
 Polizeiroboter 328  
 Polymeraktor 434  
 Poolreinigungsroboter 348  
 Portalfahrwerk 312  
 Portalroboter 50  
 Portalwagen 466  
 Positionierachse 473  
 Positionierantrieb 477  
 Positionierer 299  
 Positionierungsgrad 449  
 Position-Kraft-Regelungssystem 594  
 Positionsquant 99  
 Positionssensoren 98  
 Präzisionsroboter 330  
 Programmierhandgerät 252  
 Programmiermethoden 250  
 Programmiersprachen 251  
 Programmierverfahren 48  
 Puffer 546  
 Punktschweißen 14  
 Punkt-zu-Punkt-Steuerung 182

## Q

Quaternion 199  
 Quasifließgut 451

## R

Radantriebe 386  
 Radfahrwerk 384  
 Radsensor 391  
 Rasenmäroboter 352  
 RCS-Modul 281

Referenzpunkt 187  
 Referenzpunktfahren 220  
 Regelgröße 225  
 Regelkreis 224  
 Regelung 223  
 – nichtlineare 233  
 Regelungssystem, adaptives 237  
 Regler, digitaler 227  
 Reibungsverhalten 454  
 Reinigungsroboter 347  
 Remote-Umgebung 327  
 Resolver 103  
 Ringschalttischmaschine 556  
 Ringsensor 341  
 Ringtisch-Montagemaschine 554  
 Risikoparameter 171  
 Roboter  
 – humanoider 406  
 – kooperierende 292  
 Roboterarchitektur 177  
 Robotergenerationen 47  
 Roboterkopf 419  
 Roboterperipherie 17  
 Roboterprogrammiersprachen 255  
 Roboterstaubsauger 352  
 Robotersteuerung 179, 255  
 Robotersystem 40  
 Roboterwerkzeug 158  
 Roboterzelle 278  
 Robotik 39  
 – humanoide 412  
 Rollbahnmagazin 508  
 Rollenführung 474  
 Rollfähigkeit 451  
 Rotorautomat 578  
 ROV 351  
 RPY-Notation 198  
 Rückföhrbahn 548  
 Rückwärtstransformation 184  
 Ruheverhalten 481  
 Rundtaktmagazin 509  
 Rüsselhandgelenk 60

## S

Saugerberechnung 148  
 Scara-Roboter 49  
 Schachtmagazin 510  
 Scheibenbremse 322  
 Scheibenspeicher 509  
 Scherengreifer 133  
 Schikane 487  
 Schlupfregelung 229  
 Schnappverbindungen 543, 597  
 Schneckeneinzug 576  
 Schöpfungsegmentbunker 483  
 Schreitapparat 413  
 Schreitroboter 412  
 Schüttgutzuföhrung 519  
 Schutzgasschweißen 295  
 Schweißanlage 299  
 Schweißausrüstung 296  
 Schweißfugenabtastung 219  
 Schweißlinie, robotisierte 14  
 Schweißroboterzelle 271  
 Schwenkeinheit 471  
 Schwenkflögelmotor 469  
 Schwerlastgerät 503  
 Scouting 406  
 Seilroboter 55  
 Sensorföhrung 217  
 Sormagazin 564  
 Sensortechnik 97  
 SEQ-Notation 198  
 Servicerobotik 343  
 Servo-Parallelmanipulator 327  
 Sicherheitsfaktor 148  
 Sicherheitsvorschriften 168  
 Silhouettenerkennung 527  
 Simulation 15, 269  
 Simulationswerkzeuge 274f.  
 Singularität 192  
 Slavearm-Manipulator 332  
 SMA-Aktor 587  
 Sollbruchstelle 601  
 Speichern 505  
 Spielzeugroboter 353  
 Spindelhubsystem 321  
 Spline-Interpolation 217

Spurführungssystem 368  
 Spurrad 433  
 Stabilitätskriterium 414  
 Standsäulenmanipulator 311  
 Standsicherheit 323  
 Stapelbauweise 539  
 Steiner, Satz von 471  
 Stereobildverarbeitung 525  
 Steuerung  
 - autonome 395  
 - verhaltensbasierte 403  
 - zentrale 397  
 Stick-slip 432  
 Störungsspeicher 546  
 Struktur, kinematische 30  
 Stückdosierung 517  
 Subsumtionsmodell 247

## T

Tauchkernsensor 100  
 TCP 34, 123, 187  
 Teach-in Programmierung 48  
 Telechirurgie 329  
 Teleoperator 326  
 Teleoperatorsystem 327  
 Telepräsenz 329  
 Trägheitssensorik 114  
 Traglastdiagramm 43  
 Traglastkennlinie 46  
 Tragzahl 455  
 Transportsystem, fahrerloses 367  
 Tray 559  
 Triangulation 108

## U

Überschleifkriterium 215  
 Überschwingen 58  
 Ultraschallsensor 392  
 Umlaufmagazin 507  
 Universalroboter 52  
 Unterhaltungsroboter 354  
 Unterwasserroboter 382

## V

Vakuumsauger 142  
 van-der-Waals-Kraft 430  
 Variantenbewertung 277  
 V-Aufhängung 315  
 Verbundbauweise 539  
 Vereinzeln 496  
 Vereinzelnung 504  
 Verkettungsart 568  
 Vibrationswendelförderer 487  
 Vierquadrantenbetrieb 63  
 Vision-Algorithmus 522  
 Vision-Sensor 394  
 Volumendosierung 517  
 Vorwärtstransformation 185

## W

Wägezelle 317  
 Wälzführung 455  
 Wellgetriebe 95  
 Weltkoordinatensystem 184  
 Weltraumrobotik 346  
 Wendelaufsatz 491  
 Werkstückaufnahme 294  
 Werkstückführung 291  
 Werkstückhandhabung 302  
 Werkstückmagazine 506  
 Werkstückträger 565  
 Werkstück-Trägermagazin 509  
 Werkzeugarbeitspunkt 34  
 Werkzeuggreifer 265  
 Werkzeugkorrektur 187  
 Werkzeugorientierung 201  
 Wiederholgenauigkeit 44, 57  
 Winggreifer 154  
 Winkelhand 59  
 Wirkpunkt 187  
 Wirkzone 34, 330  
 Wirrteile 447  
 Wurfkennziffer 488



**Z**

- Zahnriemengetriebe 93
- Zellenradzuteiler 518
- Zentralhandgelenk 59
- Zentripetalgreifer 302
- Zuführbarkeitskriterium 544
- Zustimmungsschalter 252
- Zuteilen 498
- Zwei-Kanal-Schaltkreis 162
- Zylinder
  - doppeltwirkender 65
  - einfachwirkender 64