

Reimund Neugebauer (Hrsg.)

Parallelkinematische Maschinen

Reimund Neugebauer (Hrsg.)

Parallelkinematische Maschinen

Entwurf, Konstruktion, Anwendung

Mit 136 Abbildungen

 Springer

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Reimund Neugebauer
Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz, Germany
neugebauer@iwu.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

ISBN 10 3-540-20991-3 Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN 13 978-3-540-20991-1 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Umschlaggestaltung: medionet AG, Berlin
Satz: Digitale Druckvorlage des Herausgebers

Vorwort

Parallelkinematische Maschinen stellen zweifellos die spektakulärste Innovation auf dem Gebiet der Maschinenstrukturen im letzten Jahrzehnt dar. Zunächst Mitte der 90er Jahre euphorisch aufgenommen und mit reichlich Vorschusslorbeeren bedacht, dann kritisiert ob der häufig nicht erreichten hochgesteckten Erwartungen, hat sich inzwischen Realitätsdenken durchgesetzt: Einzelne Lösungen werden mit gutem Erfolg in der industriellen Praxis eingesetzt, weitere industrietaugliche Entwicklungen stehen kurz davor. Parallelkinematische Maschinen beginnen, die Plätze zu besetzen, auf denen sie ihre Vorzüge zur Geltung bringen können. Mithin ist es an der Zeit, das durch breite internationale Forschungs- und Entwicklungsaktivität akkumulierte umfangreiche Wissen in systematisierter Form dem interessierten Leser zugänglich zu machen.

Das Buch richtet sich vorrangig an Praktiker aus der Industrie, zugleich auch an Studenten höherer Semester. Diesem Anliegen entsprechend enthält es Merkmale eines Grundlagen- und eines Lehrbuches, ohne das eine bzw. andere in Reinkultur zu sein. Das Verhältnis von theorie- und praxisorientiertem Teil ist gleichfalls in diesem Sinne ausgewogen gestaltet. Grundsätzlich orientiert sich der Aufbau des Buches am Entwicklungsprozess von Parallelkinematiken in der Produktionstechnik. Die Autoren beschränken sich dabei bewusst auf die Betrachtung von Werkzeugmaschinen und Handhabungseinrichtungen.

Die wichtigsten Hauptkapitel von „Entwurfsgrundlagen“ bis „Maschinengestaltung und Einsatzerfahrungen: Ausgewählte Beispiele“ folgen einer Linie, die von eher theoretischen und allgemeinen Problemstellungen ausgeht, über die Bereitstellung geeigneter Maschinenkomponenten, die übergreifende modelltheoretische Betrachtung, eine Entwurfsbewertung und schließlich hin zu verschiedenen Bauformen parallelkinematischer Maschinen, deren praktischen Einsatz und letztlich zu den bereits in diesem Einsatzfeld gesammelten Erfahrungen reicht.

Die vorgenommene unterschiedlich breite Darstellung von parallelkinematischen Werkzeugmaschinen und Handhabungseinrichtungen resultiert aus deren möglichem Entwicklungs- und Anwendungsstand. Während bei Handhabungseinrichtungen mit vergleichsweise geringen Genauigkeitsanforderungen die Parallelkinematik durchaus etliche Anwendungs-

fälle vorweisen kann, steht ihr Einsatz bei den dazu vergleichsweise hochpräzisen Werkzeugmaschinen erst am Anfang. Auch daraus erklärt sich das starke Interesse der Forscher und Entwickler an parallelkinematischen Werkzeugmaschinen und die Konzentration auf dieses Feld im vorliegenden Buch.

Den Forschungsaktivitäten entspricht die gewaltige zur Thematik vorhandene Literaturfülle. Dem Anliegen des Buches folgend enthält das Literaturverzeichnis eine repräsentative Zusammenstellung der gegenwärtig verfügbaren Publikationen. Damit wird den Ansprüchen sowohl des Praktikers als auch des Studierenden nach weiterführender Literatur Rechnung getragen.

Hauptkapitel 7 enthält eine Reihe praktischer Ausführungs- und Anwendungsbeispiele. Da es den Rahmen des Buches sprengen würde, die Vielzahl der gegenwärtig verfügbaren PKM-Lösungen darzustellen, erscheint die Konzentration auf charakteristische Lösungen zu ausgewählten Anwendungsgebieten der für das Verständnis der Materie erfolgversprechendere Weg. Dabei ist die Berücksichtigung der unter Mitwirkung des Fraunhofer-IWU entstandenen PKM wohl legitim. Aus didaktischer Sicht wäre die durchgängige Darstellung des Entwurfsprozesses anhand eines Ausführungsbeispiels reizvoll. Allerdings hofft der Herausgeber mit der gewählten Darstellungsweise – Präsentation verschiedener Beispiele im Kontext zu den branchenspezifischen Anforderungen – ein breites Publikum anzusprechen.

Das vorliegende Buch entstand unter maßgeblicher Mitwirkung meiner jetzigen und früheren Mitarbeiter Dr.-Ing. Welf Guntram Drossel, Dipl.-Ing. Carsten Hochmuth, Dipl.-Ing. Steffen Ihlenfeldt, Prof. Dr.-Ing. Markus Krabbes, Dipl.-Ing. Reiner Nestler, Dipl.-Ing. Jürgen Schönitz und Prof. Dr.-Ing. Frank Weidermann. Für die Koordination der Arbeiten am Buch und die redaktionelle Bearbeitung waren Dr. phil. Dipl.-Ing. Carsten Krautz und Dipl.-Ing. Daniela López verantwortlich. Allen Genannten danke ich für das gezeigte Engagement sehr herzlich.

Chemnitz, im Mai 2005

Reimund Neugebauer

Autorenverzeichnis

Name	Anschrift	Mitarbeit an Kapitel
Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel	Fraunhofer-Institut für Werkzeugma- schinen und Umformtechnik IWU Reichenhainer Straße 88 09126 Chemnitz	4, 6, 7
Dipl.-Ing. Carsten Hochmuth	Fraunhofer-Institut für Werkzeugma- schinen und Umformtechnik IWU Reichenhainer Straße 88 09126 Chemnitz	7
Dipl.-Ing. Steffen Ihlenfeldt	Fraunhofer-Institut für Werkzeugma- schinen und Umformtechnik IWU Reichenhainer Straße 88 09126 Chemnitz	2, 4, 7
Prof. Dr.-Ing. Markus Krabbes	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik Postfach 30 11 66 04251 Leipzig	2, 3
Dipl.-Ing. Rainer Nestler	Fraunhofer-Institut für Werkzeugma- schinen und Umformtechnik IWU Reichenhainer Straße 88 09126 Chemnitz	6
Dipl.-Ing. Jürgen Schönitz	Fraunhofer-Institut für Werkzeugma- schinen und Umformtechnik IWU Reichenhainer Straße 88 09126 Chemnitz	5
Prof. Dr.-Ing. Frank Weidemann	Hochschule Mittweida (FH) – University of Applied Sciences Fachbereich Maschinenbau/ Feinwerktechnik Technikumplatz 17 09648 Mittweida	2, 4

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	XIII
--	-------------

1 Einleitung.....	1
1.1 Was sind Parallelkinematiken?.....	1
1.2 Historischer Überblick.....	2

Teil I: Grundlagen des Entwurfs von Parallelkinematiken

2 Strukturkonzeption	9
2.1 Allgemeine Kriterien	9
2.2 Struktursystematik	13
2.2.1 Allgemeines	13
2.2.2 Grundstrukturen.....	15
2.2.3 Konzeption der Führungsketten.....	20
2.2.4 Erweiterungen	30
2.3 Kinematik	35
2.3.1 Koordinatentransformation.....	35
2.3.2 Analytische Beschreibung	36
2.3.3 Numerische Beschreibung.....	43
2.4 Grundlegende Bemessung	49
2.4.1 Allgemeines	49
2.4.2 Kinematik und Arbeitsraum	51
2.4.3 Jacobi-Matrix und Maschinensteifigkeit	53
2.5 Optimierung.....	55
2.5.1 Allgemeines	55
2.5.2 Arbeitsraumbeschreibung.....	61
2.5.3 Einkriterielle Optimierung.....	62
2.5.4 Mehrkriterielle Optimierung.....	66
3 Steuerungskonzeption	71
3.1 Anforderungen.....	71
3.2 Basisfunktionen	74
3.2.1 Allgemeines	74

3.2.2 Rückwärtstransformation: Inverses kinematisches Problem ...	76
3.2.3 Vorwärtstransformation: Direktes kinematisches Problem	79
3.2.4 Look-Ahead	80
3.2.5 Erweiterte Funktionen	81
3.2.6 Geeignete Steuerungsarchitekturen	82
3.3 Lagebestimmung und -regelung	83
3.4 Kalibrierung und Kompensation.....	86
4 Theoretische Modellbildung	91
4.1 Übersicht.....	91
4.2 Modellbildung und Simulation der mechanischen Struktur	93
4.2.1 Allgemeines	93
4.2.2 Balkenmodell.....	94
4.2.3 Mehrkörpermodell.....	96
4.2.4 Finite-Elemente-Modell.....	100
4.3 Simulation des Gesamtverhaltens.....	105
4.3.1 Struktur, Antriebe und Regelung.....	105
4.3.2 Integration von Prozessmodellen.....	112
5 Experimentelle Modellbildung	123
5.1 Vorbetrachtung	123
5.2 Messung statischer Eigenschaften	125
5.2.1 Allgemeines	125
5.2.2 Ursachenermittlung für statische Steifigkeitsabweichungen ..	127
5.2.3 Prinzipielle Vorgehensweise	129
5.3 Messung dynamischer Eigenschaften.....	131
5.3.1 Allgemeines	131
5.3.2 Messung der relativen dynamischen Nachgiebigkeit	132
5.3.3 Ursachenermittlung dynamischer Steifigkeitsabweichungen	133
5.4 Messung thermoelastischer Eigenschaften	135
5.4.1 Allgemeines	135
5.4.2 Messung der relativen thermoelastischen Verlagerungen	136
5.4.3 Ermittlung der Ursachen thermoelastischer Verlagerungen..	137

Teil II: Maschinengestaltung und Einsatzerfahrungen; Ausgewählte Beispiele

6 Komponenten	141
6.1 Übersicht.....	141
6.2 Strebe und Antrieb.....	142
6.2.1 Charakteristik von Strebeneinheiten.....	142
6.2.2 Konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten.....	148
6.2.3 Messsysteme.....	159
6.3 Gelenke.....	162
6.3.1 Allgemeines.....	162
6.3.2 Drehgelenke mit dem Freiheitsgrad Eins.....	162
6.3.3 Drehgelenke mit den Freiheitsgraden Zwei und Drei.....	165
6.4 Gestell.....	174
6.5 Adaptronische Komponenten.....	181
7 Anwendung von Parallelkinematiken: Beispiele.....	191
7.1 Werkzeugmaschinen.....	191
7.1.1 Formen- und Werkzeugbau.....	191
7.1.2 Bearbeitung von Strukturbauteilen.....	199
7.1.3 Gehäusebearbeitung im Antriebsstrang.....	205
7.1.4 Dreidimensionales Biegen.....	213
7.2 Handhabungseinrichtungen.....	221
7.2.1 Handling großformatiger Bauteile.....	221
7.2.2 Handling leichter Bauteile.....	227
7.2.3 Mikromontage.....	229
7.3 NC-Programmierung und Referenzbeispiel.....	232
7.3.1 Anforderungen an die Programmierung.....	232
7.3.2 Vorbereitung der Aufspannposition.....	234
7.3.3 Anwendung spezifischer Frässtrategien.....	234
7.3.4 Bearbeitungssimulation und Kollisionskontrolle.....	237
7.3.5 Referenzbeispiel.....	238
Terminologie	241
Literaturverzeichnis	245
Sachverzeichnis.....	259

Formelzeichen und Abkürzungen

Großbuchstaben

A	Anzahl der Antriebsglieder
<i>A, B, C</i>	Drehachsen
D	Drehmatrix
D	Drehgelenk
D₃	Kugelgelenk
DD	Kardangelen
DKP	Direktes Kinematisches Problem
DS	Drehschubgelenk
E	Einheitsmatrix
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
EQ	Gleichung
F	Kraftvektor
<i>F</i>	Belastung, Kraft
<i>F</i>	Getriebefreiheitsgrad
FEM	Finite-Elemente-Methode
FK	Anzahl der Führungsketten
G	dynamische Nachgiebigkeitsmatrix
IKP	Inverses Kinematisches Problem
J	Jacobimatrix
<i>K</i>	Kraftübertragungsgüte
K	Konditionszahl
KGT	Kugelgewindetrieb
L_i	Länge der Strebe <i>i</i>
LE	Längeneinheit
<i>M</i>	Manipulierbarkeit
MKS	Mehrkörpersimulation
P_i	Vektor des <i>i</i> -ten Eckpunktes der Arbeitsplattform
Q	Antriebskoordinaten $(q_1, \dots, q_n)^T$
R_i	Vektor des <i>i</i> -ten Gestellpunktes des Mechanismus
<i>R</i>	Gestellradius
RT	Rückwärtstransformation
<i>S</i>	Schwerpunkt

S	Schubgelenk
S	Strebenkoordinaten
TCP	Tool Center Point
\ddot{U}	Übertragungsgüte
U	Parametervektor
VK	Vorwärtskinematik
VS	Vorwärtsstatik
VT	Vorwärtstransformation
W	Wichtungsmatrix
X	allgemeiner Lagevektor im Weltkoordinatensystem $(X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma)^T$; Arbeitsraummatrix

Kleinbuchstaben

f	Antriebskräfte
f_i	i -te Eigenfrequenz
f_i	Gelenkfreiheitsgrad des i -ten Gelenks
h	Höhe des Arbeitsraumes
i	Wichtungsparameter
k	Steifigkeit
q_i	i -te Antriebskoordinate
r	Radius der Arbeitsplattform
t	Zeit
v	Vektor

Griechische Buchstaben

α, β, γ	Euler-Winkel
φ	Neigungswinkel
μ	Kraftübertragungswinkel
λ	Eigenwert
ω_i	i -te Eigenkreisfrequenz
φ, θ, ω	Kardanwinkel

1 Einleitung

1.1 Was sind Parallelkinematiken?

Parallelkinematiken haben eigentlich keine Baugruppen, die im geometrischen Sinne parallel zueinander sind. Woher der Begriff kommt, verdeutlicht Abb. 1.1. Bei einer konventionellen seriellen Struktur sind alle Bewegungsachsen nacheinander angeordnet. Die erste Schwenkachse trägt z. B. die zweite Schwenkachse; diese wiederum trägt die translatorische Achse. Jede weitere Achse ergänzt den Mechanismus um einen weiteren Freiheitsgrad. Dabei handelt es sich um eine offene kinematische Kette; jeder Antrieb wird mit den Massen der nachfolgenden Glieder und Antriebe belastet. Die steigenden Anforderungen an die dynamischen Eigenschaften von Maschinen führen daher in ein Dilemma: Werden leistungsfähigere Antriebe in Kombination mit zusätzlichen Versteifungen verwendet, erhöhen sich die zu bewegenden Massen. Dies erfordert wiederum eine Steigerung der Antriebsleistung, die mit weiterer Massevergrößerung verbunden ist usw.

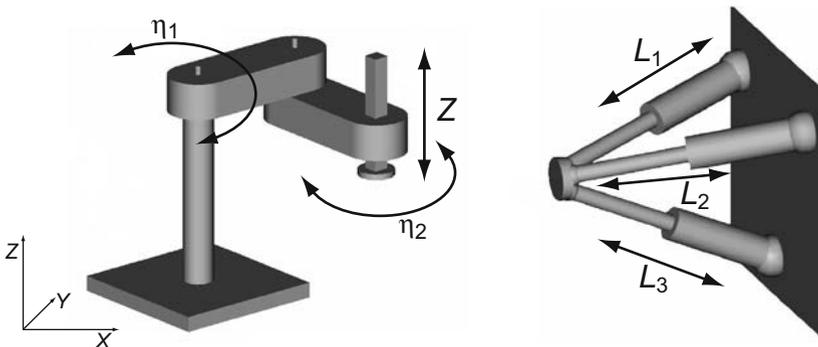


Abb. 1.1. Vergleich serieller und paralleler Strukturen [71]

Im Gegensatz dazu greifen bei einer Parallelkinematik alle Bewegungsachsen direkt oder dicht an der zu bewegenden Arbeitsplattform an. Um eine gewünschte Bewegung auszuführen, müssen alle Antriebe bewegt

werden. Es entstehen so genannte geschlossene kinematische Ketten, wodurch u. a. eine Parallelschaltung der Steifigkeiten der einzelnen Ketten erreicht wird. Bei rein paralleler Bauweise enthält jede Kette genau einen Antrieb, so dass die Anzahl der Gelenkketten mit dem Freiheitsgrad der Struktur übereinstimmt. Mechanismen, die innerhalb einer Gelenkkette über mehrere Antriebe verfügen, bezeichnet man als hybride Parallelkinematiken.

Parallelkinematiken weisen im Vergleich zu seriellen Kinematiken eine ganze Reihe von Vorteilen auf. Besonders hervorzuheben sind die geringen zu bewegenden Massen sowie die günstigen dynamischen Eigenschaften. Bei entsprechender Wahl der Gelenke werden die Glieder überwiegend auf Druck oder Zug beansprucht. Im Vergleich zu Industrierobotern ist besonders die hohe Wiederholgenauigkeit hervorzuheben.

Natürlich gibt es auch Nachteile, so z. B. der im Verhältnis zum Bauraum relativ kleine Arbeitsraum, die teilweise geringen Schwenkwinkel und die durch Koordinatentransformation aufwändige Steuerung. Ein weiterer Nachteil gegenüber Präzisions-Werkzeugmaschinen sind die noch zu geringen absoluten Positioniergenauigkeiten. Auch Entwicklung und Optimierung angepasster Maschinenelemente wie Kardan- und Kugelgelenke bieten noch Handlungsbedarf.

Moderne Fertigungseinrichtungen entwickeln sich immer mehr zu mechatronischen Systemen, die Mechanik und Elektronik miteinander verbinden und so „Intelligenz“ verliehen bekommen. Parallelkinematiken bieten aufgrund ihres modularen Aufbaus mit einem hohen Anteil an Sensorik und Aktorik eine fast ideale Basis für mechatronische Produktionsanlagen. In dem Maße, wie es gelingt, die bestehenden Defizite zu beseitigen, erweitert sich für Parallelkinematiken die Chance, sich als effektives, aus der Fertigungstechnik nicht mehr weg zu denkendes Produktionsmittel zu etablieren.

1.2 Historischer Überblick

Während theoretische Arbeiten zu parallelkinematischen Mechanismen bereits Jahrhunderte zurückreichen, sind praktische Anwendungen erst aus dem 20. Jahrhundert bekannt. Ob das in Abb. 1.2. dargestellte parallelkinematische System wirklich das erste war und ob es auch gebaut wurde, ist nicht bekannt. Sein Erfinder, James Gwinnett, war seiner Zeit sicher weit voraus.

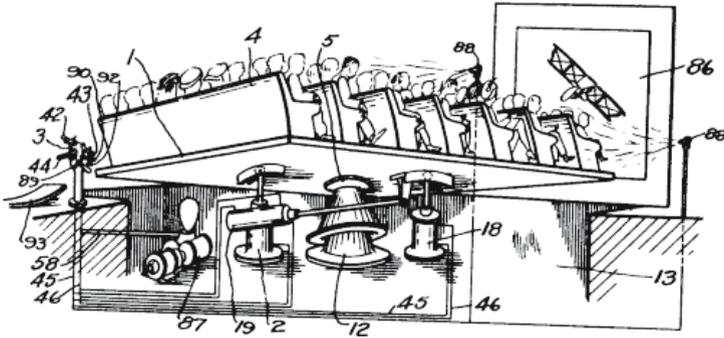


Abb. 1.2. 1931 von James Gwinnett patentierter Bewegungssimulator (US-Patent 1,789,680)

Als erste räumliche Parallelkinematik für den industriellen Einsatz gilt der von Willard L. V. Pollard konstruierte Lackier-Roboter mit dem Freiheitsgrad Fünf. Leider wurde diese Konstruktion nie realisiert. Pollards Sohn, Willard L. G. Pollard Jr., reichte 1934 ein Patent zu dem in Abb. 1.3. dargestellten Mechanismus sowie der dazugehörigen elektrischen Steuerung ein, das 1942 erteilt wurde. Auch diesem Mechanismus blieb die technische Umsetzung versagt: Das Unternehmen DEVILISS – später der erste Hersteller von Industrierobotern – kaufte zwar eine Lizenz, nutzte aber letzten Endes nur die Steuerung.

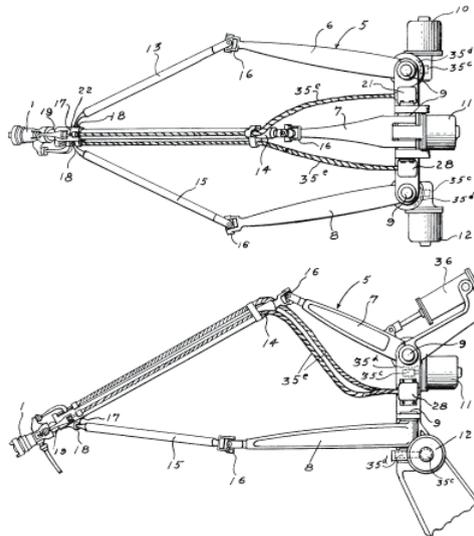


Abb. 1.3. Lackier-Roboter mit paralleler Kinematik von Willard L. V. Pollard; patentiert 1942 (US-Patent 2,286,571)

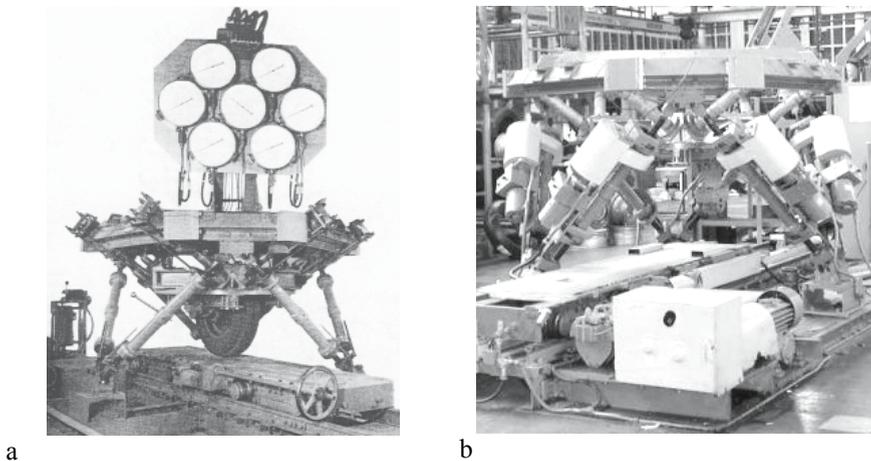


Abb. 1.4. Die originale Gough-Plattform; **a** 1954 und **b** 2000

Einige Jahre später wurde ein parallelkinematischer Mechanismus entwickelt, der Berühmtheit erlangte und tausendfach nachgebaut wurde: die auf dem (damals schon längst bekannten) Hexapod-Prinzip basierende Reifenprüfeinrichtung des Engländers Eric Gough, der für die DUNLOP RUBBER CO. in Birmingham arbeitete. Ziel der Entwicklung war, die Eigenschaften von Flugzeugreifen unter verschiedensten Belastungsbedingungen testen zu können, Abb. 1.4.

1965 beschreibt D. Stewart in der Zeitschrift der INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS IMEChE eine Bewegungsplattform für Flugsimulatoren, die auf einem parallelen Mechanismus basiert, der jedoch mit dem heute oft als „Stewart-Plattform“ bezeichneten Prinzip nichts zu tun hatte.

Zeitgleich hatte bereits der Amerikaner Klaus Cappel, Mitarbeiter der FRANKLIN INSTITUTE RESEARCH LABORATORIES in Philadelphia, auf Anregung des Unternehmens UNITED TECHNOLOGIES einen Flugsimulator für Helikopter entwickelt und 1964 ein entsprechendes Patent eingereicht, s. Abb. 1.5. Darauf basierend wurden in den folgenden Jahrzehnten von mehreren Herstellern Flugsimulatoren entwickelt und produziert.

In den 80er und 90er Jahren wurden Parallelkinematiken vor allem für Handhabungseinrichtungen entwickelt und auch zunehmend industriell genutzt, s. z. B. [84, 18, 51, 105].

Erste Ansätze zur Nutzung von Parallelkinematiken als Werkzeugmaschine stammen aus der ehemaligen UdSSR gegen Ende der 70er Jahre [64, 65] am Novosibirsker Elektrotechnischen Institut. Bis Anfang der 90er Jahre entstanden mehrere Prototypen. Ende der 80er Jahre wurde auch in den USA die Entwicklung parallelkinematischer Werkzeugmaschinen forciert [81]. In den darauf folgenden Jahren wurden – durch ein-

schlägige nationale und internationale Forschungsprogramme unterstützt – immer wieder neue Prototypen entwickelt, gebaut und auf internationalen Messen und Tagungen vorgestellt. Bis heute sind weltweit einige wirklich praxistaugliche Bearbeitungsmaschinen und Handhabungseinrichtungen entstanden, die teilweise bereits den Durchbruch in die industrielle Praxis geschafft haben. Einen entsprechenden Überblick vermittelt auch [10]. In den folgenden Kapiteln werden sowohl die theoretischen Grundlagen erläutert als auch einige Maschinen näher beschrieben.

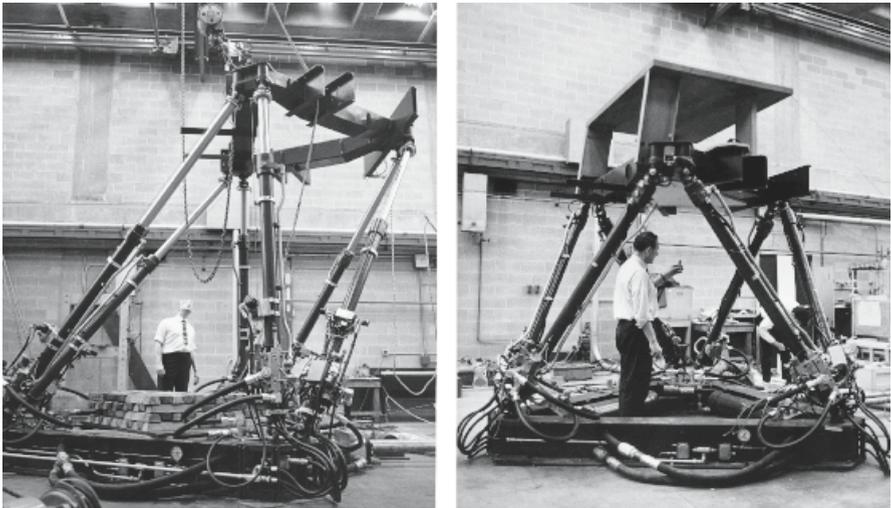


Abb. 1.5. Der erste kommerziell vermarktete Flugsimulator, der Mitte der 60er Jahre von Klaus Cappel entwickelt wurde

Teil I:

**Grundlagen des Entwurfs
von Parallelkinematiken**

2 Strukturkonzeption

2.1 Allgemeine Kriterien

In diesem Kapitel werden die zur strukturellen Auslegung einer Maschine benötigten Kriterien betrachtet. Dabei wird unter einer Maschine ein System verstanden, mit dessen Hilfe ein Objekt durch einen technischen Prozess von einem Zustand in einen anderen Zustand überführt wird. Eine Maschine kann die in Abb. 2.1. allgemein dargestellte Bearbeitungsaufgabe nur dann erfüllen, wenn sie in ihren Eigenschaften bestimmten Kriterien genügt. Diese wiederum lassen sich in verschiedenen Konkretisierungsstufen aus den durch die Arbeitsaufgabe gestellten Anforderungen ableiten.

Im vorliegenden Buch werden sowohl parallelkinematische Werkzeugmaschinen als auch Handhabungseinrichtungen behandelt. Folgt man dem in Abb. 2.1. Gezeigten, so ergeben sich bei der Formulierung der Anforderungen, die an eine zu gestaltende Maschine gestellt werden, folgende Schritte:

1. Beschreibung der Arbeitsaufgabe,
2. Ableitung arbeitsaufgabenspezifischer Anforderungen,
3. Ableitung von Anforderungen an die Maschine, ausgedrückt durch zu erreichende Kennwerte.

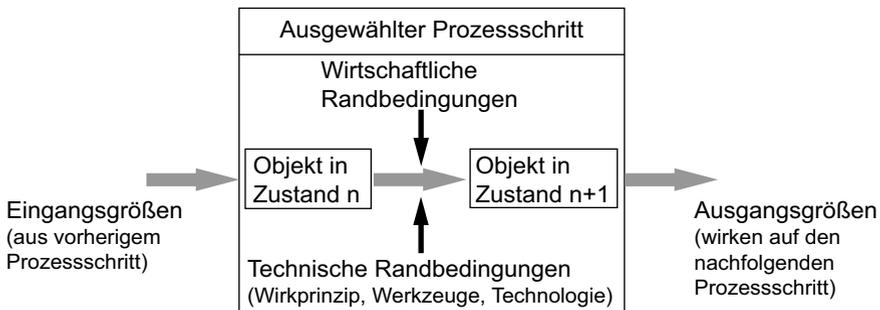


Abb. 2.1. Allgemeine Beschreibung einer Bearbeitungsaufgabe

In Tabelle 2.1. sind die gängigen Definitionen der Begriffe „Werkzeugmaschine“ und „Handhabungseinrichtung“ genannt, die eine Basis zur Herleitung der Anforderungsbilder darstellen. Betrachtet man das gesamte Umfeld der Fertigungstechnik, so kann man entsprechend Abb. 2.1. und [161] nachfolgende Prozesse benennen, die von den Maschinen, die Gegenstand des vorliegenden Buches sind, ausgeführt werden, nämlich:

- Formänderung,
- Strukturänderung und
- Ortsänderung.

Diese Prozesse gelten sowohl für die gesamte Prozesskette als auch für einzelne Prozessschritte.

Tabelle 2.1. Begriffsbestimmung: Werkzeugmaschine; Handhabungseinrichtung

Werkzeugmaschinen	Handhabungseinrichtungen
Fertigungseinrichtungen in mechanisierter und mehr oder weniger automatisierter Form, die durch Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen, vgl. [150].	Einrichtungen zum Schaffen bzw. zum definierten Verändern oder zum vorübergehenden Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung geometrisch bestimmter Körper innerhalb eines Bezugskordinatensystems, vgl. [143]

Ziel dieses Kapitels ist es, darzustellen, wie aus der Arbeitsaufgabe entsprechende Anforderungen an eine parallelkinematische Maschine entstehen, was u. a. in [90] kurz behandelt wird. Einem Anforderungsprofil an die zu entwerfende parallelkinematische Maschine werden im Auslegungsprozess konkrete Kriterien zugeordnet, die in systematischem Zusammenhang gemäß Tabelle 2.2. stehen. Kriterien, die für parallelkinematische Maschinen nicht von speziellem Interesse sind, wurden nicht berücksichtigt, so z. B. die u. a. in [100] dargestellten Anforderungen, die sich auf die Ergonomie oder die Montage beziehen. Die genannten Kriterien sind schließlich mit Hilfe von Auslegungs- und Dimensionierungsmethoden, wie sie beispielhaft in den folgenden Kapiteln beschrieben werden, quantitativ zu untersetzen.

Tabelle 2.2. verdeutlicht, dass unter einer bestimmten technischen Randbedingung, durch die beispielsweise das Wirkprinzip „Umformen“ festgelegt wird, bei Überführung des Werkstücks von einem Bearbeitungszustand in den nächsten eine bestimmte Wirkkraft erforderlich ist. Die zu entwickelnde Werkzeugmaschine muss daher entsprechenden Anforderungen hinsichtlich der Antriebsleistung, der Antriebskraft und der Kraftübertragung genügen. Je nach Arbeitsaufgabe ergibt sich somit ein spezielles

Anforderungsbild, das im Wesentlichen aus der unterschiedlichen Wichtung der Kriterien folgt. Dabei ist es immer möglich, dass bestimmte Parameter keinen Einfluss auf das Anforderungsbild haben. Für die Bewertung aller Kriterien ist hinsichtlich parallelkinematischer Maschinen zu beachten, dass einige (z. B. der Arbeits- und der Bauraum) global, das heißt positionsunabhängig sind, andere (z. B. die Steifigkeit) dagegen positionsabhängig. Durch Einbeziehung von Mindestforderungen und Optimierungswünschen ergibt sich aus dem Anforderungsbild ein Lastenheft mit geforderten Werten und Zielfunktionen, aus dem schließlich ein Pflichtenheft resultiert.

Tabelle 2.2. Aus der Arbeitsaufgabe resultierende Anforderungen und aus ihnen abgeleitete Kriterien, die die Maschine erfüllen muss

Anforderungen seitens der Arbeitsaufgabe		Abgeleitete Kriterien, die die Maschine erfüllen muss		
Geometrie	Abmessungen	Arbeitsraum (Größe und Form) Singularitätsfreiheit		
	Formelemente	Elementarbewegungen (Rotationen, Translationen) Freiheitsgrade		
	Vielfalt <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>eines Objektes</td> <td rowspan="2">Mengen- und Werkstück- flexibilität (Rekonfigurierbarkeit)</td> </tr> <tr> <td>verschiedener Objekte</td> </tr> </table>	eines Objektes	Mengen- und Werkstück- flexibilität (Rekonfigurierbarkeit)	verschiedener Objekte
eines Objektes	Mengen- und Werkstück- flexibilität (Rekonfigurierbarkeit)			
verschiedener Objekte				
Bearbeitungsgüte	Form- und Lageabweichung	Positioniergenauigkeit Steifigkeit		
	Oberflächenqualität	Eigenfrequenzen Systemdämpfung		
Wirkprinzip	Wirkbewegung	Schnittbew.	Antriebsdynamik, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsübertragung	
		Vorschubbew.		
		Zustellbew.		
	Wirkkraft	Antriebsleistung Antriebskraft Kraftübertragung		
Kosten	Arbeitszeitkosten	Dynamik		
	Maschinengrundkosten	Bauraum Zugänglichkeit des Arbeitsraums Anzahl der Konstruktionselemente Komplexität der Konstruktionselemente		

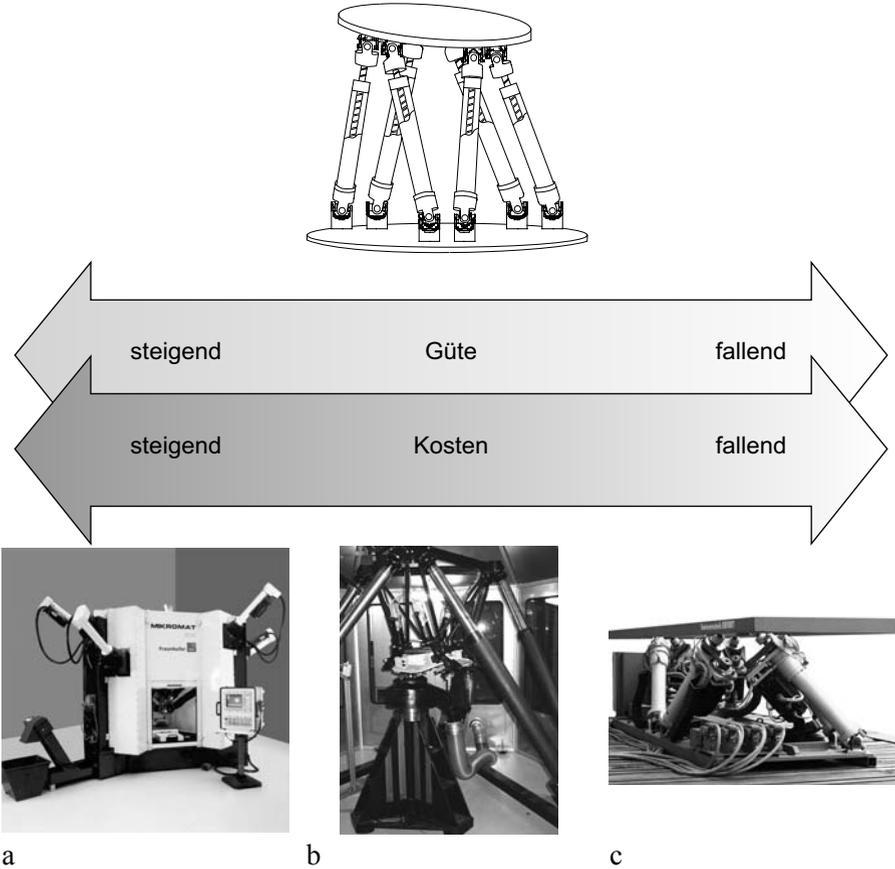


Abb. 2.2. Verschiedene parallelkinematische Maschinen mit ein und derselben Struktur (Parallelkinematik mit dem Freiheitsgrad Sechs)

- a: Werkzeugmaschine für die Freiformbearbeitung (MIKROMAT 6X HEXA, FRAUNHOFER IWU)
- b: Maschine zur integrierten Handhabung und Bearbeitung FELIX (IWM, TU DRESDEN), z. B. Komplettbearbeitung von Holzformteilen einschließlich Teile-Zu- und Abfuhr
- c: Handhabungseinrichtung TAS (UMFORMTECHNIK ERFURT GMBH, FRAUNHOFER IWU)

In Abb. 2.2. ist dargestellt, dass basierend auf ein und derselben Struktur allein durch die unterschiedliche Wichtung der Kriterien bei spanenden Fertigungseinrichtungen und Einrichtungen zur Handhabung verschiedene Anforderungsprofile an die zu gestaltende Maschine entstehen. In der Abbildung wurden aus Gründen der Vereinfachung der Darstellung nur zwei Anforderungen seitens der Arbeitsaufgabe berücksichtigt, nämlich

die (technische) Güte und die Kosten, aus denen maschinenseitig bestimmte Anforderungen an die Eigenfrequenzen, die Positioniergenauigkeit, die Steifigkeit und die Systemdämpfung bzw. die Dynamik und den Bauraum abzuleiten sind. Es wird deutlich, dass die Anforderungen an die Güte und damit die entstehenden Kosten entscheidenden Einfluss auf die Gestaltung der Maschine haben.

Das hier dargestellte Kriteriensystem ist für das vorliegende Buch als Leitfaden zu verstehen, da die genannten Kriterien in allen Passagen mit jeweils unterschiedlicher Wichtung – sowohl bezogen auf die Dimensionierungsgrundlagen als auch als Bewertungsbasis für die dargestellten Maschinen – eine Rolle spielen. Dabei erhebt dieses System keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit, sondern dient hauptsächlich dem konkreten Anliegen des Buches.

2.2 Struktursystematik

2.2.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt zeigt das Vorgehen zum Finden der kinematischen Struktur, die als Getriebe gesehen werden kann. Bei der Beschreibung des Synthese- und Analyseprozesses von Getrieben werden verschiedene Abstraktionsstufen durchlaufen. Diese, nämlich das kinematische Schema, das kinematische Prinzip und schließlich die kinematische Struktur, werden z. B. in [30] kurz beschrieben. Die nach einem Durchlauf der einzelnen Stufen entstandenen Ergebnisse hängen in der Regel wechselseitig miteinander zusammen, was um der klareren Darstellung willen hier allerdings weitgehend vernachlässigt werden soll.

Der Begriff „Struktur“ wird im Weiteren sowohl ganz allgemein als „Aufbau“, „Zusammensetzung“ oder „innere Gliederung“ verstanden als auch konkret als „kinematische Struktur“. Die im Folgenden dargestellte Systematik bezieht sich aufgrund der Allgemeingültigkeit der Aussagen nicht nur auf parallelkinematische Maschinen, sondern auf parallelkinematische Mechanismen insgesamt. Sie gibt eine Übersicht sowohl über die parallelkinematischen Mechanismen, die sich anhand bestimmter Klassifizierungsmerkmale in einer geschlossenen Darstellung erfassen lassen, als auch über solche, die aus ihnen ableitbar sind und sich einer geschlossenen Darstellung weitestgehend entziehen. Soweit es sich um die erstgenannten Strukturen handelt, wird dem Konstrukteur ein Instrument zur Verfügung gestellt, mit dessen Hilfe er bereits in der Entwurfsphase in der Lage ist, systematisch, mit vergleichsweise geringem Aufwand ein kinematisches Schema für die Lösung seiner Aufgabe zu finden. In Bezug auf die oben

genannten abgeleiteten Mechanismen werden im Weiteren beispielartig Erweiterungsmöglichkeiten gezeigt. Aufgrund der besonderen Schwierigkeiten u. a. bei Synthese und Analyse paralleler Strukturen und wegen der in aller Regel recht anspruchsvollen Lösung des direkten kinematischen Problems ist eine Systematik gerade dieser Strukturen dringend erforderlich. Eine solche Systematik ist dann geschlossen darstellbar, wenn unter den Grundstrukturen diejenigen verstanden werden, aus denen durch Kombination oder Hinzufügen seriellkinematischer Ketten weitere ableitbar sind. Diese Ableitungen führen zu einer Vielzahl von Strukturen, die sich anhand der im Folgenden verwendeten Ordnungskriterien nur schwer systematisch darstellen lassen. So sind nahezu beliebig viele seriellkinematische Kombinationen parallelkinematischer Grundstrukturen möglich. Im vorliegenden Buch erfolgt daher lediglich eine systematische Darstellung parallelkinematischer Grundstrukturen, nicht jedoch der Strukturen, die aus ihren Erweiterungen entstehen. Mögliche Ansätze für eine solche Systematik werden z. B. in [14] für Werkzeugmaschinen oder in [70] für Getriebe gezeigt. Parallelkinematische Mechanismen sind – aus getriebe-technischer Sicht betrachtet – ungleichmäßig übersetzende Mechanismen. Hinsichtlich ihrer Funktion kann man zwischen Übertragungsgetrieben und Führungsgetrieben unterscheiden. Erstere dienen der Übertragung mechanischer Leistung, bei Letzteren wird ein Getriebeglied so geführt, dass es bestimmte Lagen einnimmt, bzw. dass seine Punkte bestimmte Bahnen, sog. Führungsbahnen, beschreiben [145, 146]. Eine aus energetischer Sicht untergeordnete Rolle spielt bei Führungsgetrieben deren Übertragungsfunktion. Mechanismen mit parallelen Strukturen werden den Führungsgetrieben zugeordnet. Da Getriebe nach ihren charakteristischen Bestandteilen eingeteilt werden können, gehören die hier interessierenden Mechanismen zu den Koppelgetrieben. Die eben betrachteten Kriterien geben den parallelkinematischen Mechanismen einen eindeutigen Platz innerhalb der Ordnung aller Getriebe. Parallelkinematiken sind Führungsgetriebe, bei denen die Arbeitsplattform über mindestens zwei angetriebene Führungsketten mit dem Gestell verbunden ist.

Bisher gibt es verschiedene Systematiken parallelkinematischer Strukturen, von denen aber keine als allgemein verbindlich anzusehen ist. Für die weiteren Betrachtungen, die auf [30, 53, 68, 154] sowie grundlegenden Überlegungen zum Zwanglauf [41] basieren, wird daher zunächst eine Systematisierung anhand der Ordnungskriterien „Freiheitsgrad“, „Anzahl der Führungsketten“ und „Anzahl der Antriebe“ verwendet. Dadurch können nicht nur bereits vorhandene, sondern auch künftige lauffähige parallelkinematische Strukturen erfasst werden. Diesen Ordnungskriterien lässt sich entsprechend [145, 146] das weitere Kriterium der Raumanordnung der Drehachsen zuordnen, das die Unterscheidung parallelkinemati-

scher Mechanismen hinsichtlich ihres kinematischen Aufbaus in „eben“, „sphärisch“ und „räumlich“ gestattet. Aus der Anzahl der unabhängigen Bewegungen in der jeweiligen Dimension ergeben sich somit ebene und sphärische Parallelkinematiken der Freiheitsgrade Zwei und Drei sowie räumliche Parallelkinematiken der Freiheitsgrade Zwei bis Sechs.

Abschließend sollen andere Struktursystematiken kurz betrachtet werden. Diese benennen beispielsweise parallelkinematische Mechanismen entsprechend der in einer kinematischen Kette verwendeten Gelenke und greifen auf den Freiheitsgrad des Mechanismus als Ordnungskriterium zurück [84]. Andere systematisieren nach dem Freiheitsgrad der kinematischen Kette und den in ihr vorkommenden Gelenken [137, 138]. Die Anordnung der Gelenkpunkte dient z. B. in [101] und [28] als Systematisierungskriterium; konstruktive Gesichtspunkte dagegen in [108, 109]. Weitere nennenswerte Systematiken sind aus [131] oder [104] bekannt. Die Anwendung solcher Klassifikatoren, wie sie u. a. in [159] und [70] entwickelt wurden, ist eine weitere Möglichkeiten zur Systematisierung parallelkinematischer Mechanismen. Auf diese Art lassen sich auch Informationen über den Freiheitsgrad des parallelkinematischen Mechanismus sowie über Art bzw. Aufbau der entsprechenden kinematischen Ketten gewinnen [159].

Für die Systematisierung parallelkinematischer Maschinen innerhalb dieses Buches erscheinen die genannten Struktursystematiken nur bedingt geeignet, da sie entweder zu spezielle Ordnungskriterien verwenden oder deren praktischer Gebrauch dadurch erschwert wird, dass beispielsweise die Verwendung von Klassifikatoren immer auch noch eine Vorschrift für deren Bildung voraussetzt.

2.2.2 Grundstrukturen

Das kinematische Schema einer parallelen Grundstruktur ist in Abb. 2.3. dargestellt. Es dient im Weiteren zur Veranschaulichung der allgemeinen Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen einer solchen Grundstruktur. Diese Beziehungen spielen in der hier verwendeten Systematik eine entscheidende Rolle. Bevor die Systematik der parallelkinematischen Grundstrukturen dargestellt werden kann, muss das kinematische Schema zum kinematischen Prinzip konkretisiert werden, da nur an ihm erste Klassifizierungen erkennbar sind. Für die Grundstrukturen gilt, dass die Anzahl der Antriebe mit dem Freiheitsgrad des Mechanismus identisch sein muss, und dass die Antriebe selbst so anzuordnen sind, dass jede Führungskette mindestens eine Arbeitsplattformfreiheit binden kann.

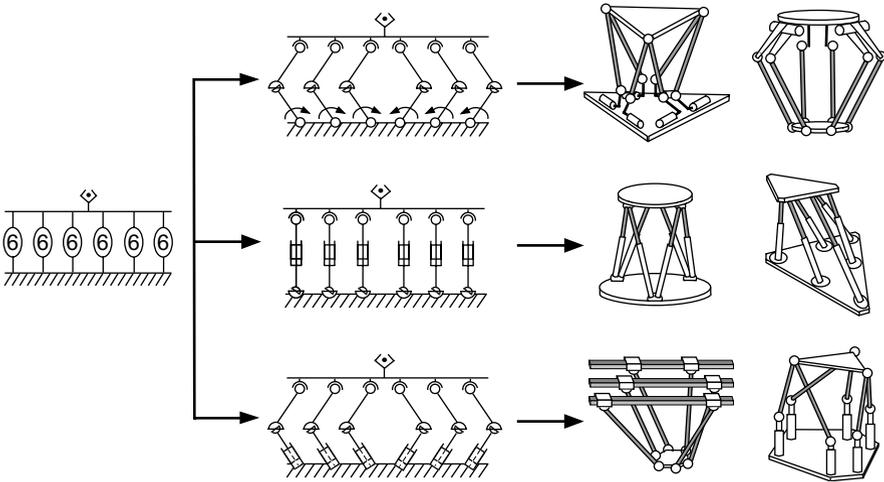


Abb. 2.3. Entwicklung einer Parallelkinematik: vom kinematischen Schema über das kinematische Prinzip zur kinematischen Struktur; nach [30]

Mit Blick auf die Gestaltung der Führungsketten der interessierenden Maschinen und deren Systematik ist festzuhalten, dass den o. g. Grundstrukturen folgende, nach der Verteilung der Antriebe klassifizierte, kinematische Prinzipie zugrunde liegen können:

- Alle Führungsketten haben genau einen Antrieb mit dem Freiheitsgrad Eins.
- Mindestens eine Führungskette hat mehr als einen Antrieb mit dem Freiheitsgrad Eins.
- Mindestens eine Führungskette hat keinen Antrieb.

In Abb. 2.4. wird ein Überblick über die im Weiteren näher betrachteten Grundstrukturen gegeben.

Ausgehend von den Gleichungen (2.1) und (2.2) zur Bestimmung des Freiheitsgrades von Mechanismen werden die Mechanismen so abstrahiert, dass nur noch die Anzahl der Führungsketten FK und deren Freiheitsgrad F in die Berechnung eingehen. Der Freiheitsgrad F der Führungsketten wird berechnet aus dem Freiheitsgrad der Führungsketten gemäß Gln. (2.1) und (2.2) plus dem Gelenkfreiheitsgrad des Verbindungsgelenks zwischen Führungskette und Arbeitsplattform. Bei räumlichen Getrieben mit ebenen Teilgetrieben werden letztere gesondert behandelt. Sie werden als Ersatzgelenk mit dem entsprechenden Gelenkfreiheitsgrad in der Freiheitsgradberechnung des räumlichen Getriebes berücksichtigt.

$$F = 6(n-1) - 6g + \sum_{i=1}^g f_i - F_{id} \quad (\text{räumlich}) \quad (2.1)$$

$$F = 3(n-1) - 3g + \sum_{i=1}^g f_i \quad (\text{sphärisch/eben}) \quad (2.2)$$

n Anzahl der Mechanismenglieder.

g Anzahl der Gelenke.

f_i Gelenkfreiheitsgrad des i -ten Gelenks.

F_{id} identischer Freiheitsgrad.

Beispiel für Abb. 2.4. a mit acht Mechanismengliedern und neun Gelenken:
 $F = 3(8-1) - 3 \cdot 9 = 3$

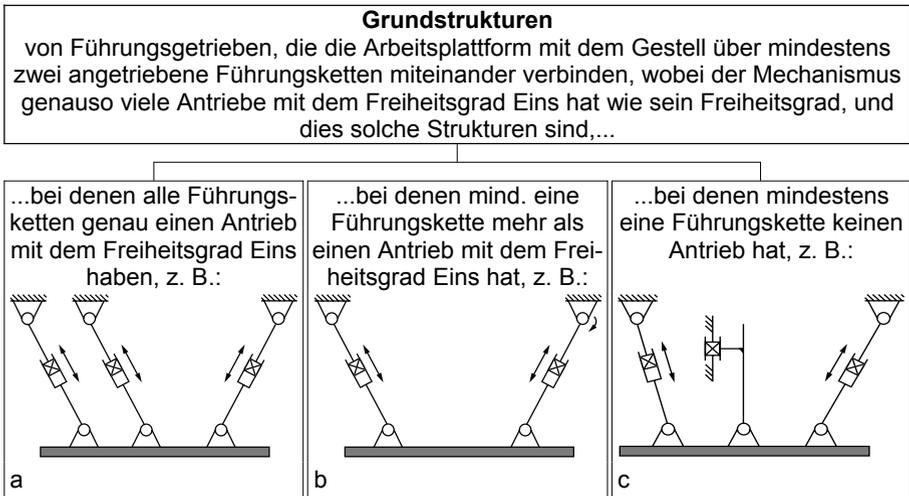


Abb. 2.4. Beispiele kinematischer Prinzipie paralleler Grundstrukturen

a: ebene Parallelkinematik mit $F = FK = 3$

b: ebene Parallelkinematik mit $F = 3, FK = 2$

c: ebene Parallelkinematik mit $F = 2, FK = 3$

Aus den o. g. Gleichungen für den Getriebefreiheitsgrad und der Definition von Parallelkinematiken ergeben sich die in Tabelle 2.3. dargestellten Kombinationen möglicher parallelkinematischer Grundstrukturen. Die Verteilung der Freiheiten auf die einzelnen Führungsketten wird durch die in Klammern stehenden Zahlenkombinationen angedeutet. Hinzuzufügen ist, dass Führungsketten mit $F = 6$ mindestens einen Antrieb haben müssen, da sie sonst für den Mechanismus ohne kinematische Bedeutung sind.

Generell sind als Führungsketten Getriebe beliebiger kinematischer Struktur denkbar.

In der Systematik der Grundstrukturen sollen nicht-serielle Führungsketten und nicht-serielle Teile von Führungsketten mit Ersatzgelenken des Freiheitsgrades des ersetzten Teilgetriebes auf serielle Führungsketten zurückgeführt werden. Strukturverzweigungen innerhalb der Grundstrukturen, ausführlich z. B. in [30] dargestellt, sind prinzipiell möglich, führen aber nicht auf die in Kap. 2.2.4 beschriebenen erweiterten Strukturen. Die Verzweigungsmöglichkeiten entweder innerhalb des Mechanismus (Hinzufügen einer kinematischen Kette) oder innerhalb einer bestehenden kinematischen Kette (Einfügen von Gelenken und Gliedern) führen so zu kinematischen Strukturen, die in Tabelle 2.3. auf bzw. unterhalb der Diagonale liegen. In Anlehnung an [30] werden die jeweiligen Tabellenfelder als kinematische Schemata bestimmter parallelkinematischer Grundstrukturen verstanden.

Tabelle 2.3. Summe der Gelenkfreiheiten $\sum f_i$ ebener bzw. sphärischer (hinterlegt) und räumlicher paralleler Grundstrukturen sowie Verteilung (Klammerwerte) der Gelenkfreiheiten auf die einzelnen Führungsketten in Abhängigkeit von Getriebe-freiheitsgrad F und Anzahl der Führungsketten FK, s. Gln. (2.1) und (2.2)

	F	2	3	4	5	6
FK						
2		$\sum f_i = 8$ (4,4/3,5/2,6)	$\sum f_i = 9$ (4,5/3,6)	$\sum f_i = 10$ (5,5/4,6)	$\sum f_i = 11$ (5,6)	$\sum f_i = 12$ (6,6)
		$\sum f_i = 5$ (2,3)	$\sum f_i = 6$ (3,3)			
3		$\sum f_i = 14$ (4,5,5/2,6,6/ 4,4,6/3,5,6)	$\sum f_i = 15$ (5,5,5/4,5,6/ 3,6,6)	$\sum f_i = 16$ (5,5,6/4,6,6)	$\sum f_i = 17$ (5,6,6)	$\sum f_i = 18$ (6,6,6)
		$\sum f_i = 8$ (2,3,3)	$\sum f_i = 9$ (3,3,3)			
4		$\sum f_i = 20$ (5,5,5,5/4,5,5,6/ 3,5,6,6/4,4,6,6)	$\sum f_i = 21$ (5,5,5,6/4,5,6,6/ 3,6,6,6)	$\sum f_i = 22$ (5,5,6,6/ 4,6,6,6)	$\sum f_i = 23$ (5,6,6,6)	$\sum f_i = 24$ (6,6,6,6)
5		$\sum f_i = 26$ (5,5,5,5,6/ 4,5,5,6,6)	$\sum f_i = 27$ (5,5,5,6,6/ 4,5,6,6,6)	$\sum f_i = 28$ (5,5,6,6,6/ 4,6,6,6,6)	$\sum f_i = 29$ (5,6,6,6,6)	$\sum f_i = 30$ (6,6,6,6,6)
6		$\sum f_i = 32$ (5,5,5,5,6,6)	$\sum f_i = 33$ (5,5,5,6,6,6)	$\sum f_i = 34$ (5,5,6,6,6,6)	$\sum f_i = 35$ (5,6,6,6,6,6)	$\sum f_i = 36$ (6,6,6,6,6,6)