

Kapitel 2

Stand der Technik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik und die aktuellen Forschungsziele und -inhalte der Bereiche, die in dieser Arbeit adressiert werden. Zunächst werden die verwendeten Begriffe definiert (Abschnitt 2.1). Dann wird die Bedeutung anthropomorpher Kinematiken in der Robotik (Abschnitt 2.2) und in Simulationen zur „Virtuellen Produktion“ (Abschnitt 2.3 auf Seite 21) herausgestellt und der Einsatz von Multi-Agentensystemen zur Steuerung beschrieben (Abschnitt 2.4 auf Seite 25). Abschließend werden die Kriterien der Auswahl des Simulations- und Visualisierungssystems erläutert, das als Entwicklungsumgebung die Basis der Implementierung dieser Arbeit bildet (Abschnitt 2.5 auf Seite 29).

2.1 Definition der Begriffe

Die Lehre der *Kinematik* befasst sich mit der Beschreibung von Bewegungsapparaten und Bewegungen anhand ihrer geometrischen und zeitabhängigen Eigenschaften, jedoch ohne die dynamischen Aspekte der Bewegungserzeugung zu betrachten [74].

Ein Bewegungsapparat heißt *anthropomorphe Kinematik*, falls er allgemein „dem Menschen nachempfunden“ ist [254][117]. Während serielle Kinematiken als offene kinematische Ketten modelliert sind, ist es ein charakteristisches Merkmal anthropomorpher Kinematiken, dass sie den menschlichen Bewegungsapparat ganz oder in Teilen auf eine kinematische Baumstruktur abbilden [163].

Ein Roboter heißt *humanoider Roboter* oder *anthropomorpher Roboter*, falls er eine anthropomorphe Kinematik realisiert. In einigen Zusammenhängen werden allerdings auch Roboter als anthropomorph beschrieben, bei denen andere ausgewählte Aspekte menschenähnlich sind, wie z.B. die Proportionen, die Mimik oder das Verhalten in der Interaktion [194][197][302].

Auf Grundlage der strengen Definition des Industrieroboters [324] ist ein *Mehrrobotersystem* ein aus mehreren Industrierobotern bestehendes System. Allerdings werden insbesondere im Bereich der mobilen Robotik [19] auch aus Robotern anderer Arten bestehende Systeme als Mehrrobotersysteme bezeichnet.

Ein Mehrrobotersystem heißt hier *anthropomorphes Mehrrobotersystem*, falls ein aus mehreren Industrierobotern bestehendes System Handhabungs- und Fertigungsaufgaben löst, indem es wie der menschliche Bewegungsapparat strukturiert ist.

2.2 Anthropomorphe Kinematiken als Schlüsselentwicklung der Robotik

Aktuelle Entwicklungen in der Robotik zielen darauf ab, die Effizienz von Robotern im industriellen Einsatz zu erhöhen und neue Einsatzgebiete von Robotern im Servicebereich vorzubereiten. Als Schlüssel zur Realisierung dieser Effizienzsteigerung und dieser Erschließung neuer Anwendungsfelder für Roboter wird das Verständnis von anthropomorphen Kinematiken angesehen. Im industriellen Sektor steht dabei die menschenähnliche Koordination der etablierten und leistungsstarken Industrieroboter im Vordergrund, um auf Basis der existierenden Technik zunehmend komplexere Aufgaben realisieren zu können. In der Forschung dagegen werden auch gänzlich neue kinematische Konfigurationen erprobt – humanoide Roboter sind wie der Bewegungsapparat des Menschen strukturiert und werden geeignet gesteuert, um mit menschenähnlichen Bewegungsmöglichkeiten den Einsatz von Robotern im Servicebereich auszuweiten.

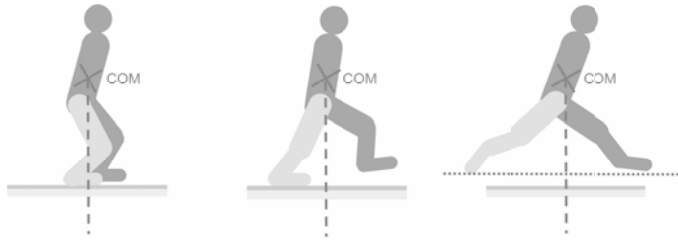
2.2.1 *Anthropomorphe Roboter in der Forschung*

Die Steuerung anthropomorpher Roboter stellt ein wesentliches Ziel der Forschung in der Robotik dar [289][327]. Im idealen Fall weisen anthropomorphe Roboter ähnliche Bewegungsmöglichkeiten und Proportionen wie der Mensch auf und sind daher besonders für die freie Bewegung in der direkten Umgebung des Menschen geeignet. Werden auch die Bewegungsabläufe dieser Roboter menschenähnlich gestaltet, kann zudem von einer richtiggehenden „Körpersprache“ anthropomorpher Robotern gesprochen werden [220][253], aus der menschliche Interaktionspartner Rückschlüsse auf die Beweggründe und Pläne des Roboters ziehen können. Das Ziel der Forschung ist es, in schrittweisen Annäherungen an das beschriebene Ideal die notwendigen technischen und konzeptionellen Voraussetzungen zu schaffen, um zukünftig humanoide Roboter als vielseitige Plattform einsetzen zu können. Aufgrund ihrer Eigenschaften sind humanoide Roboter dann besonders für Anwendungen der Service-robotik geeignet.

2.2.1.1 Bewegungssteuerung von anthropomorphen Robotern

Die Aufgabe der Bewegungssteuerung von Robotern besteht in der Generierung von Steuerbefehlen für ihre Aktoren, um vorgegebene Bewegungsfolgen umzusetzen. Die Ursprünge von Bewegungssteuerungen anthropomorpher Roboter liegen in der Betrachtung kinematischer Baumstrukturen [163]. Darauf basierende, so genannte „Open Loop“-Steuerungen führen Bewegungen ohne Rückführung der Ergebnisse und folglich ohne Regelung aus. Erst in weiterführenden, so genannten „Closed Loop“-Steuerungen wurden diese Steuerungen systematisch um die Rückführung kinematischer und dynamischer Bewegungsgrößen und deren Regelung ergänzt [195][103][165][256]. Aufbauend auf diesen grundsätzlichen Ansatz der Bewegungssteuerung findet in der aktuellen Forschung häufig eine Konzentration auf spezielle, abgegrenzte Aspekte der Bewegungssteuerung statt, wie z.B. das Gehen. Innerhalb dieser Aspekte ist jeweils eine Weiterentwicklung von Lösungsansätzen einzelner Details festzustellen, wohingegen nur vergleichsweise wenige allgemeine Ansätze zur Bewegungssteuerung anthropomorpher Roboter existieren, die eine geschlossene Behandlung vollständiger humanoider Roboter vorsehen [285][224][166].

Abb. 2.1 Charakteristische Momente beim statischen Gehen (l.), dynamischen Gehen (m.) und beim dynamischen Laufen (r.); jeweils mit Massenzentrum COM („Center of Mass“)



Im Folgenden werden aktuelle Verfahren und Forschungsrichtungen der Bewegungssteuerung anthropomorpher Roboter am Beispiel zweibeinig gehender (bipedaler) Plattformen erörtert. Eine grundsätzliche Klassifizierung der Verfahren zur bipedalen Fortbewegung wird anhand der Stabilität der Gangart vorgenommen. Verfahren zum *statischen Gehen* führen einen Roboter derart, dass zu jedem Zeitpunkt der Bewegung seine statische Stabilität gesichert ist (siehe Bild 2.1 (l.)). Dabei wird die Lage eines bipedalen Roboters als statisch stabil bezeichnet, wenn er sich zu jedem Zeitpunkt und ohne Steuerungsmaßnahmen in einem statischen Gleichgewicht befindet und nicht umkippt oder fällt. Die zweite Klasse von Verfahren beschreibt das *dynamische Gehen*, bei dem zyklisch abwechselnd ein Fuß für eine Schrittbewegung vom Boden gelöst wird, während der jeweils andere Fuß den Bodenkontakt hält. Jeder Schrittzzyklus beginnt und endet mit einer Phase statischer Stabilität, in der zwischenzeitig beide Füße Bodenkontakt haben. Während der Schrittbewegung durchläuft der Roboter eine Phase dynamischer Stabilität (siehe Bild 2.1 (m.)). Die Lage eines bipedalen Roboters wird als dynamisch stabil bezeichnet, wenn er durch Steuerungsmaßnahmen in einem labilen Gleichgewicht gehalten wird und sonst umkippen oder fallen würde. Im Vergleich dazu entfallen bei der dritten Form der bipedalen Fortbewegung, dem *dynamischen Laufen*, die Phasen statischer Stabilität, da ein Schrittzzyklus jeweils mit nur einem einseitigen Bodenkontakt beginnt bzw. endet und die eigentliche Schrittbewegung durch eine schnelle Gangart gänzlich ohne Bodenkontakt erfolgt (siehe Bild 2.1 (r.)). Entsprechend ist es im Fall des Laufens notwendig, den bipedalen Roboter durch eine Regelung durchgängig dynamisch zu stabilisieren [289].

Die Aufgabe der Bewegungssteuerung bipedaler Roboter besteht darin, die gewünschte Gangart umzusetzen und dabei die Stabilität des Roboters zu gewährleisten. Als wichtiger Indikator der Stabilität gilt dabei die Berechnung der Lage des „Zero Moment Point“ [ZMP]. Die Beschreibung des ZMP erfolgt für die so genannte „Single Support Phase“, in der ein einzelner Fuß mit seiner „Support Polygon“ genannten Kontaktfläche auf den Boden aufgesetzt ist (siehe Bild 2.2 a)). In Bild 2.2 b) ist die dynamische Situation des aufgesetzten Fußes dargestellt. Alle am Roboter wirkenden Kräfte und Momente werden überhalb des Fußgelenkes als eine dort im Punkt A eingeprägte Kraft \underline{F}_A und ein eingepprägtes Moment \underline{M}_A modelliert. Die Zusammensetzung von \underline{F}_A und \underline{M}_A umfasst zum einen die Gewichtskräfte aller Gelenkkörper und die dadurch induzierten Versatzmomente; zum anderen müssen alle in den Gelenken des Roboters eingepprägten Antriebsmomente betrachtet werden, da jede Bewegung, insbesondere auch die der Arme, Einfluss auf das Gleichgewicht hat [237]. Am Kontaktpunkt P des aufgesetzten Fußes greifen die Reaktionskraft \underline{R}_P und das Reaktionsmoment \underline{M}_P des Bodens an. Zusätzlich wird der Fuß als Masse m_C in seinem Schwerpunkt C modelliert; g bezeichnet die Gravitationskraft.

Aus dem Impulserhaltungssatz [128] folgt für die Stabilisierung des Roboters in der „Single Support Phase“, dass durch die Reaktionskräfte und -momente des Bodenkontakts alle anderen am Roboter wirkenden Kräfte und Momente kompensiert werden, so dass sich bezüglich des Schwerpunktes C folgende Kräfte- und Momentensummen ergeben:

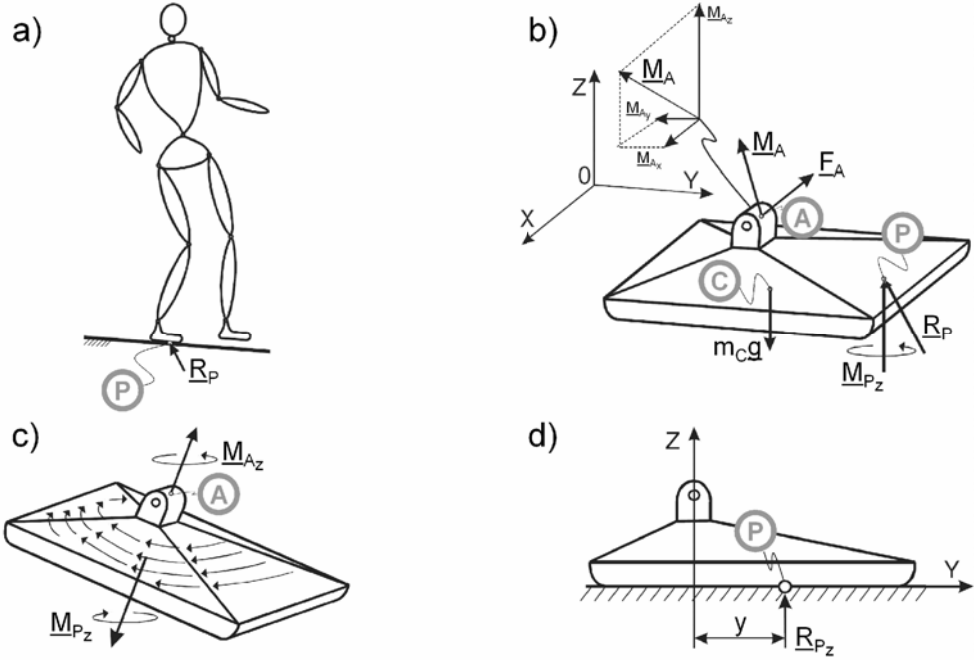


Abb. 2.2 a) Reaktionskraft am Kontaktpunkt, b) Kräfte und Momente am Fuß, c) Kompensation der Momente in Z-Richtung und d) Kompensation der Kräfte in Z-Richtung; nach [328]

$$\sum \underline{F}_C = 0 = \underline{R}_P + \underline{F}_A + (m_C \underline{g}) \quad (2.1)$$

$$\sum \underline{M}_C = 0 = (\underline{p} \times \underline{R}_P) + (\underline{c} \times (m_C \underline{g})) + \underline{M}_A + \underline{M}_P + (\underline{a} \times \underline{F}_A), \quad (2.2)$$

mit \underline{p} , \underline{a} und \underline{c} als Ortsvektoren zum Kontaktpunkt P , bzw. zum Ansatz des Fußgelenkes A und zum Schwerpunkt C .

Gemäß dem Ansatz des ZMP wird dann der Fall des dynamisch stabil ruhenden Fußes analysiert [328]. Da der Fuß ruht und keine horizontalen translatorischen Bewegungen ausführt, kann geschlossen werden, dass die Haftreibung die eingprägten horizontalen Kraftkomponenten F_{Ax} und F_{Ay} kompensiert und damit R_{Px} und R_{Py} gerade diesen horizontalen Reibungskräften entsprechen. Da der Fuß keine rotatorische Bewegung um die Z-Richtung ausführt, kann außerdem geschlossen werden, dass aufgrund der Haftreibung zudem M_{Pz} die eingprägte vertikale Momentkomponente M_{Az} (sowie ferner die Z-Komponenten der durch \underline{F}_A induzierten Versatzmomente) kompensiert (siehe Bild 2.2 c)). Weiter folgt aus der Kräfte-summe (2.1), dass die vertikale Komponente der Reaktionskraft R_{Pz} den vertikal aufsetzenden Kräften F_{Az} und $m_C \underline{g}$ entgegenwirkt.

Damit konzentriert sich die Analyse auf die Kompensation der eingprägten horizontalen Momentkomponenten M_{Ax} und M_{Ay} (sowie ferner der X- und Y-Komponenten der durch \underline{F}_A induzierten Versatzmomente). Die Reaktion des dynamischen Systems des Fußes zur Kompensation dieser eingprägten horizontalen Momentkomponenten besteht in der Verschiebung des Kontaktpunktes P im „Support Polygon“ und einem Anstieg von R_{Pz} . In Bild 2.2 d) ist eine derartige Verschiebung des Kontaktpunktes P um eine Distanz y dargestellt, die aus der Kompensation eines Anteils M_{Ax} resultiert. Sind die eingprägten horizontalen Momentenkomponenten zu groß, wird der Kontaktpunkt P schließlich an den Rand des „Support Polygon“ verschoben, so dass die kompensierende Wirkung der Haftreibung wegfällt und der

Fuß rutscht. Außerdem greift die Z-Komponente R_{P_z} der Reaktionskraft am Rand der Fußfläche an und resultiert in einem Kippen des Fußes über seine Kante – was in der Regel den Sturz des bipedalen Roboters zur Folge hat. Eine wesentliche Bedingung für das dynamische Gleichgewicht des bipedalen Roboters ist es daher, dass alle eingeprägten horizontalen Momentkomponenten kompensiert sind und sich die horizontalen Komponenten des Reaktionsmomentes gerade zu Null ergeben,

$$M_{P_x} = 0 \wedge M_{P_y} = 0 \quad (2.3)$$

Derjenige Punkt im „Support Polygon“, für den die Bedingung (2.3) gilt, stellt folglich einen dynamisch stabilen Kontaktpunkt dar und wird als „Zero Moment Point“ bezeichnet [329][328][327].

Beim Gehen bipedaler Roboter ist es dann das Ziel, die eingeprägte Kraft \underline{F}_A und das eingeprägte Moment \underline{M}_A durch die Vorgabe entsprechender Gelenkbewegungen der Gesamtkinematik derart zu regeln, dass der resultierende Kontaktpunkt den Gleichgewichtsbedingungen (2.3) des ZMP genügt. Eine Gruppe von Ansätzen orientiert sich dazu an geeigneten Referenztrajektorien des ZMP, in deren Nähe der tatsächliche Kontaktpunkt geführt werden muss, um den Roboter dynamisch zu stabilisieren. Dazu werden „Walking Patterns“, Schrittbewegungen der Beine und der Füße vorgegeben, so dass die Trajektorien der Kontaktflächen bekannt sind, und damit wiederum Trajektorien in den Kontaktflächen liegender, sicherer ZMPs berechnet werden können. Alle anderen Bewegungen des Körpers werden dann dazu eingesetzt, den tatsächlichen Kontaktpunkt entlang dieser Referenztrajektorien des ZMP zu führen [346][156][232][210].

In der Regel erschwert die Komplexität der dynamischen Modelle die Herleitung einer gewünschten Dynamik des gesamten Roboters aus Referenztrajektorien des ZMP, so dass verschiedene Modellvereinfachungen vorgeschlagen werden. Häufige Vereinfachungen bestehen darin, den Oberkörper des Roboters insgesamt als dreidimensionales inverses Pendel zu betrachten [233][307][98] oder das Gesamtproblem mittels „Dynamischer Filter“ in besser und schneller zu berechnende Einzelprobleme zu zerlegen [222][223]. Weitere Verfeinerungen und Abwandlungen der ZMP-basierten Verfahren adressieren Themen, wie das Laufen [157][316], die Fortbewegung in rauhem Gelände [144][311] oder die Objektmanipulation während des Gehens [200].

Neben den ZMP-basierten Verfahren existieren alternative Ansätze zum dynamischen Gehen und Laufen, in denen die geometrischen und die dynamischen Anforderungen an eine Schrittfolge zugleich und eng gekoppelt ermittelt werden. Diese so genannten „Position/Force“- oder kinodynamischen Verfahren wurden zur allgemeinen Bewegungssteuerung von Robotern entwickelt (siehe Abschnitt 2.2.1.3 auf Seite 11) und werden zunehmend auch für die Fortbewegung bipedaler Roboter zur Anwendung gebracht [173][136][57].

2.2.1.2 Bewegungsplanung für anthropomorphe Roboter

Die Bewegungsplanung dient der Ermittlung einer geeigneten Bewegungsfolge, die einen Roboter ausgehend von der aktuellen Konfiguration kollisionsfrei in eine gegebene Zielkonfiguration überführt. Es stehen dabei unterschiedliche Verfahren zur Auswahl, um Hindernisse, bzw. kollisionsfreie Gebiete der Arbeitsumgebung eines Roboters zum Zweck der Bewegungsplanung zu kartieren. Im Fall der *kartesischen Modellierung* wird die Umgebung des Roboters mittels „Boundary Representations“ [BREPs] [5][305] geometrisch modelliert. Ansätze zur Bewegungsplanung, die kartesische Modellierungen der Umgebung als Planungsgrundlage nutzen [172][227][64], sind nachweislich bereits für einfache Situationen mit we-

nigen BREPs durch die resultierende Komplexität des Planungsproblems in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt [283]. Eine für Roboter angepasste Transformation des geometrischen Planungsproblems stellt der Übergang auf den *Konfigurationsraum* dar [191]. Bei dieser Abbildung der Umgebung eines Roboters mit n Gelenken entspricht eine n -dimensionale Koordinate des Konfigurationsraumes einer Gelenkstellung q_n des Roboters. Karten des Konfigurationsraumes werden gebildet, indem die möglichen Gelenkstellungen des Roboters in gegebenen Diskretisierungsschritten abgetastet werden. Treten dabei Gelenkstellungen auf, die eine Kollision des Roboters mit der Umgebung bedeuten, werden die entsprechenden Wertebereiche des Konfigurationsraumes zur Durchfahrt gesperrt.

Auf Karten des Konfigurationsraumes basierend wurde eine Vielzahl von Bewegungsplanern für Roboter entwickelt, die – insofern eine hinreichende Abdeckung und Genauigkeit der Diskretisierung des Konfigurationsraumes gegeben ist – als *globale Verfahren* klassifiziert werden und exakte Lösungen des Planungsproblems ermitteln, indem stets die gesamte Karte auf einen kollisionsfreien Pfad untersucht wird. Wie im Fall der kartesischen Modellierung ist es eine wesentliche Eigenschaft globaler Planungsverfahren im Konfigurationsraum, dass die Komplexität des Planungsproblems mit dem Detailgrad der Modellierung der Umgebung zunimmt, die hier durch die Genauigkeit der Diskretisierung bestimmt wird. Zusätzlich steigt die Komplexität des Planungsproblems exponentiell mit der Anzahl n der Dimensionen des Konfigurationsraumes, d.h. der Anzahl der Gelenke des Roboters [59]. Vornehmliches Ziel globaler Planungsverfahren im Konfigurationsraum ist es daher, die Komplexität des Planungsproblems durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren und den Zeitbedarf für die Planung einer Bewegung auch für reale Arbeitsumgebungen von Robotern online-fähig zu machen oder zumindest in annehmbaren Grenzen zu halten [52][101][192].

In Abgrenzung zu den globalen Verfahren existiert daneben die Klasse der *lokalen Verfahren*, die der Komplexität des Planungsproblems begegnen, indem jeweils nur eine enge, lokale Umgebung des Roboters auf Kollisionsfreiheit untersucht wird. Lokale Bewegungsplaner ermitteln eine Gesamtlösung des Planungsproblems dann durch die inkrementelle Aneinanderreihung der örtlich begrenzten Teillösungen. Die grundlegende Idee der lokalen Bewegungsplanung wird z.B. durch den Ansatz der Potenzialfelder wiedergegeben [164]. Dazu wird die Umgebung als „goal attractive“ modelliert, indem das einzunehmende Ziel den Roboter aus seiner Ausgangsstellung heraus im Sinne eines Potentials anzieht, während Hindernisse in der Umgebung den Roboter abstoßen. In einem derart definierten Potenzialfeld kann mittels eines Gradientenabstiegsverfahrens ein kollisionsfreier Pfad in die Zielkonfiguration sukzessive entwickelt werden, wobei jeweils nur ein örtlich begrenzter Ausschnitt des Feldes untersucht werden muss. Die primäre Herausforderung bei der Umsetzung einer Bewegungsplanung gemäß dem Ansatz der Potenzialfelder besteht in lokalen Minima, aus denen ein einfaches Abstiegsverfahren mangels der globalen Sicht auf die Situation nicht entkommen kann, so dass der entwickelte Pfad die Zielkonfiguration nicht erreicht. Im Gegensatz zu globalen Planungsverfahren, die vollständig genannt werden, da sie die Findung eines Pfades erlauben, sofern er existiert, ist der lokale Ansatz der Potenzialfelder und darauf aufbauende Verfahren nicht vollständig [102].

Das Problem der lokalen Minima kann umgangen werden, indem die lokale Suche des Bewegungsplaners Minima erkennt und ihnen entkommen kann. Eine Strategie, lokalen Minima zu entkommen, besteht in einer begrenzten Randomisierung der Suche – im einfachsten Fall wird dem Gradientenabstiegsverfahren dabei eine Art „Brownsche Bewegung“ überlagert, um tendenziell dem globalen Ziel näher zu kommen, aber andererseits durch sporadische Sprünge im Suchraum einem Verharren in lokalen Minima zu begegnen [27][28][182]. Anlässlich derartiger „Randomized Path Planners“ [RPPs] wird zusätzlich der Begriff der Vollständigkeit detaillierter gefasst. Es liegt dann die so genannte probabilistische Vollständigkeit

vor, falls die Wahrscheinlichkeit des Findens eines kollisionsfreien Pfades bei zunehmender Laufzeit der Suche gegen 1 konvergiert, sofern eine Lösung existiert [180]. Eine ähnliche Entwicklung stellen „Probabilistic Road Maps“ [PRMs] dar, die ebenfalls als lokale Verfahren auch bei komplexen Problemstellungen in der Praxis annehmbare Laufzeiten aufweisen können und dabei die probabilistische Vollständigkeit zum Ziel haben. In diesen Verfahren wird der Suchraum mittels adaptiver Abtaststrategien geprüft, um einen Graphen kollisionsfreier Pfade, eine Roadmap, zu erzeugen [231][162]. Jüngere kinodynamische Verfahren erweitern die Ansätze RPP und PRM zusätzlich, indem sie den Konfigurationsraum über Gelenkstellungen hinaus um weitere kinematische und dynamische Freiräume bzw. Beschränkungen von Robotern ergänzen. Durch Berechnung entsprechender dynamischer Modelle des Roboters erfassen kinodynamische Suchräume insbesondere die verfügbaren Gelenkbeschleunigungen und -momente, sowie wie Bereiche dynamischer Stabilität, z.B. im Sinne des ZMP [173][350]. Die resultierenden, hochdimensionalen Suchräume werden u.a. mittels „Rapidly-Exploring Random Trees“ [RRTs] effizient zur Bewegungsplanung vorbereitet, indem zufällige Koordinaten im Suchraum zu einem baumförmigen Graphen kinematisch und dynamisch frei einnehmbarer und auch stabil ansteuerbarer Konfigurationen verbunden werden [183][184].

2.2.1.3 Steuerungskonzepte für anthropomorphe Roboter

Die bisher beschriebenen Ansätze zur Bewegungsplanung und -steuerung sind in der Regel Teile eines übergeordneten Steuerungskonzeptes, das den Roboter anhand eines Umweltmodells befähigt, gegebene Aufgaben durch geeignete Abfolgen von Bewegungs-, Greif- und anderen Aktionen zu lösen. Mit zunehmender Komplexität der angestrebten Aufgaben wächst auch die Zahl der zu berücksichtigenden Aspekte der Umwelt und es wird der Einsatz umfassender maschineller Planungsstrategien notwendig [125]. Insbesondere die frühen und grundlegenden Steuerungskonzepte für Roboter sind daher zumeist in der direkten Koentwicklung mit dem reifenden Gebiet der „Artificial Intelligence“ [AI] entstanden. Kennzeichen dieser Steuerungskonzepte ist zum einen ihre Organisation in einer strikten „Top Down“-Struktur, in der eine gegebene Aufgabe zunächst anhand einer abstrakten, symbolischen Beschreibung der Ist- und Soll-Zustände der Umwelt gelöst wird und die Ausführung durch den Roboter erst auf Basis eines vollständigen Plans erfolgt (siehe Bild 2.3 a)). Zum anderen ist für sie charakteristisch, dass die Aspekte Wahrnehmung, Interpretation, Planung und Aktion des Planungsproblems zentralisiert behandelt werden, um der „Top Down“-Struktur gerecht zu werden [221][339].

Derartigen planungsorientierten Verfahren stehen so genannte verhaltensbasierte Ansätze gegenüber, in denen komplexe Verhaltenweisen aus dem Zusammenspiel einfacher Sensor- und Aktormodule erzeugt werden, z.B. Ausweichreaktionen mobiler Roboter im Fall von Kollisionen [41]. Um auf Basis grundlegender Reaktionen zunehmend anspruchsvollere Verhaltenweisen, „Skills“, zu ermöglichen, werden die Module in Schichten angeordnet, die zu zunehmend abstrakteren Interpretationen der gegebenen Situation fähig sind [48][49]. Da sie in dieser Anordnung „Top Down“-Strukturen gleichermaßen umkehren, werden die verhaltensbasierten Ansätze als „Bottom Up“-Strukturen klassifiziert (siehe Gegenüberstellung a) und b) in Bild 2.3). Eine bekannte „Bottom Up“-Struktur für mobile Roboter ist die „Subsumption Architecture“ (engl. „Unterordnungsarchitektur“) [47]. Das Grundprinzip der „Subsumption Architecture“ ist in Bild 2.3 c) gezeigt. Sensorikmodule ermitteln interne und externe Sensordaten. Diese Sensordaten werden Schichten aufgeschaltet, die aufsteigend von unten nach oben jeweils komplexere „Skills“ ermöglichen. Die Ausgänge der Schichten sind

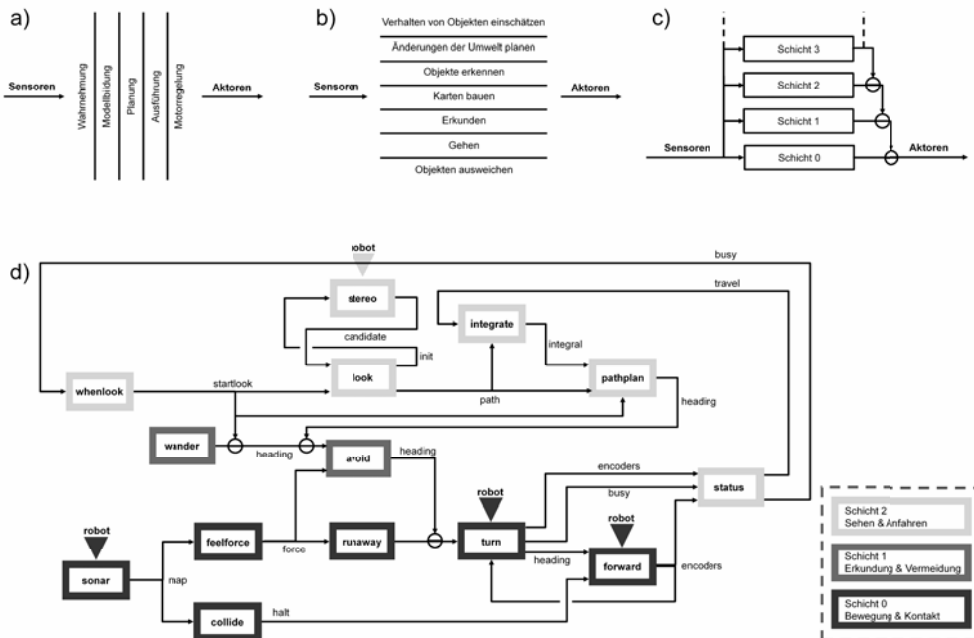


Abb. 2.3 Gegenüberstellung von a) „Top Down“-Struktur und b) „Bottom-Up“-Struktur, c) Grundprinzip der „Subsumption Architecture“ und d) Realisierung der „Subsumption Architecture“ für einen mobilen Roboter; nach [47]

wiederum mit den Aktormodulen des Roboters verbunden, wobei die höheren Schichten die Ausgänge der niedrigeren Schichten gegebenenfalls unterdrücken bzw. unterordnen können. Ein praktische Realisierung der „Subsumption Architecture“ für einen mobilen Roboter zeigt in Bild 2.3 d); ähnliche Netzwerke wurden eingesetzt, um „Walking Patterns“ für mehrbeinige, insektenartige Roboter zu erzeugen [50].

Ein weiterer Ansatz „Bottom Up“ strukturierter Steuerungskonzepte basiert auf neuronalen Netzen. In Anlehnung an den Aufbau des Gehirns aus vernetzten Neuronen werden hier kleinste Rechenknoten verschaltet. Diese künstlichen Neuronen werden von gewichteten Eingangssignalen angeregt. Übersteigt die Anregung gewisse Schwellwerte, lösen die Neuronen Ausgangssignale aus, sie „feuern“. Bereits mit diesen simplen Eigenschaften sind neuronale Netze prinzipiell z.B. zur Klassifizierung fähig und können für unterschiedliche Sensordaten unterschiedliche Reaktionen auf die Aktoren aufschalten. Solche Verhaltensmuster werden in neuronalen Netzen mittels der Gewichte, Schwellwerte und Verknüpfungen zwischen den Neuronen codiert. Die große Zahl der Parameter, die für ein gewünschtes Verhalten dann einzustellen ist, wird üblicherweise mit Methoden maschinellen Lernens ermittelt. Auch in Ansätzen mit neuronalen Netzen wurden zunächst „Walking Patterns“ für insektenartige Roboter generiert [187][121]. Doch auch Grundlagen des bipedalen Gehens konnten mit dieser Art von „Bottom Up“ strukturiertem Steuerungskonzept nachvollzogen werden [250].

Neben neuronalen Netzen existieren weitere Ansätze im Gebiet der „Computational Intelligence“, die die Betrachtung übergeordneter Steuerungskonzepte schrittweise in die Domäne der Steuerungs- und Regelungstechnik verlagern, indem der Roboter als dynamisches System im regelungstechnischen Sinne behandelt wird. Ausgehend von neuronalen Netzen werden z.B. so genannte „neuronale Felder“ eingesetzt, um aus den technischen Zustandsgrößen des Roboters neue Zustandsvariablen zu generieren, die als Verhaltensmuster interpretierbar sind

[281][31]. Ebenfalls im Gebiet der „Computational Intelligence“ angesiedelt sind übergeordnete Steuerungskonzepte für Roboter auf Basis der „Fuzzy Control“ [267][118][308].

2.2.1.4 „Hybrid Control“ und „Supervisory Control“

Ein weiteres Steuerungskonzept mit einer regelungstechnischen Herangehensweise liegt mit dem Ansatz der „Hybrid Control“ vor. Darin wird der Roboter durch eine Zusammensetzung dynamischer Systeme im regelungstechnischen Sinne beschrieben, die zusammenfassend als *Regelstrecke* („Plant“) bezeichnet werden. Die Steuerung erfolgt durch ein weiteres dynamisches System, dem *Regler* („Controller“). Die Besonderheit der hier beschriebenen Form der „Hybrid Control“ besteht dann darin, dass die Regelstrecke in einem kontinuierlichen Zustandsraum arbeitet, während der Regler in einem diskreten Zustandsraum operiert. Die Kommunikation der kontinuierlichen Regelstrecke mit dem diskreten Regler wird daher über ein Schnittstellenmodul hergestellt, das Änderungen der Zustandsvariablen der Regelstrecke in Eingangssymbole des Reglers wandelt und umgekehrt Ausgangssymbole des Reglers in Eingangsgrößen der Regelstrecke übersetzt (siehe Bild 2.4).

Für die Regelstrecke können die bekannten Systemgleichungen für den Zustandsvektor $\underline{x} \in \mathbb{R}^n$, $n \in \mathbb{N}$, die Eingangsgrößen $\underline{u} \in \mathbb{R}^m$, $m \in \mathbb{N}$ und die Ausgangsgrößen $\underline{y} \in \mathbb{R}^p$, $p \in \mathbb{N}$ aufgestellt werden [303].

$$\dot{\underline{x}} = f(\underline{x}, \underline{u}) \quad (2.4)$$

$$\underline{y} = g(\underline{x}) \quad (2.5)$$

Der Regler dagegen kann beschrieben werden als ein deterministischer Automat, der mittels zweier Transitionsfunktionen Zustände des Reglers $\tilde{x} \in \tilde{X}$, Eingangssymbole $\tilde{u} \in \tilde{U}$ und Ausgangssymbole $\tilde{y} \in \tilde{Y}$ ineinander überführt; der Index i bezeichnet dabei eine zeitliche Abfolge der Zustände.

$$\tilde{x}_i = \delta(\tilde{x}_{i-1}, \tilde{u}_i) \quad (2.6)$$

$$\tilde{y}_i = \phi(\tilde{x}_i) \quad (2.7)$$

Das Schnittstellenmodul besteht aus zwei Abbildungsvorschriften; der so bezeichnete *Generator* $\alpha: \mathbb{R}^n \rightarrow \tilde{U}$ erzeugt für ausgewählte Änderungen der Zustandsvariablen der Regelstrecke entsprechende Eingangssymbole für den Regler, der so genannte *Aktuator* $\gamma: \tilde{Y} \rightarrow \mathbb{R}^m$ schaltet für Ausgangssymbole des Reglers stückweise konstante Eingangsgrößen auf die Regelstrecke auf.

$$\tilde{u} = \alpha(\underline{x}) \quad (2.8)$$

$$\underline{u} = \gamma(\tilde{y}) \quad (2.9)$$

Indem Veränderungen der Zustandsvariablen der Regelstrecke auf äußere (physikalische) Ereignisse zurückgeführt werden und diese ereignisbedingten Zustandsänderungen über das Schnittstellenmodul auf den diskreten Zustandsraum des Reglers einwirken, kann der Regler als „Discrete Event System“ [DES] klassifiziert werden. Ein DES ist ein dynamisches System, das sich anhand sporadischer, abrupten, äußerer Ereignisse entwickelt. Für die Klasse der als DES beschreibbaren dynamischen Systeme existiert in der Regelungstechnik ein umfangreicher Methodenapparat, auf den für die Analyse und den zielgerichteten Entwurf des Reglers zurückgegriffen werden kann [248][35].

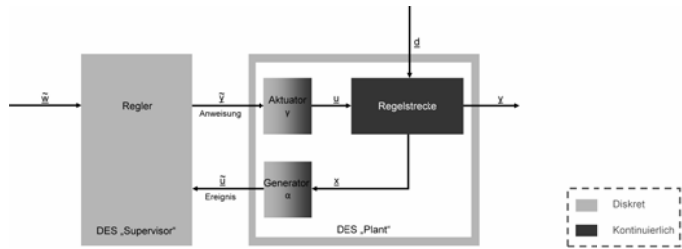


Abb. 2.4 Übergang von der „Hybrid Control“ zur „Supervisory Control“

Über die bisher betrachtete, einfache „Hybrid Control“ hinaus ist es möglich, die Regelstrecke und das Schnittstellenmodul als eine Einheit zu betrachten, die sich aus der Sicht des Reglers ebenfalls wie ein DES verhält (siehe Bild 2.4). Aufgrund des verbleibenden Unterschieds, dass im Inneren dieser Einheit weiterhin der kontinuierliche Zustandsraum der Regelstrecke besteht, wird diese Einheit in Abgrenzung zu dem Begriff des DES auch als „DES Plant Model“ bezeichnet [303]. Ein verbreiteter Ansatz zur Steuerung dieser geschlossenen Verschaltung von als DES beschreibbaren Regelstrecke und Reglern ist die „Supervisory Control“. Die Ausgänge des zu steuernden, ereignisdiskreten Systems der Regelstrecke bewirken Zustandsübergänge in dem dann als *Supervisor* bezeichneten ereignisdiskreten System des Reglers, der anhand der Übergänge angemessene Steuerungskommandos bestimmt und diese in der Rückführung zur Regulierung der Regelstrecke aufschaltet [247][342]. Der Ansatz eines diskreten Zustandsraumes im Supervisor erlaubt die Einführung bzw. Herleitung neuer Zustände, die zunächst noch eng an die abgebildeten Zustandsvariablen der Regelstrecke gekoppelt sind, darauf aufbauend aber auch Zustände sein können, die ein hohes Abstraktionsniveau aufweisen und damit die Transparenz des Reglerentwurfes steigern. Das Ziel des Steuerungsentwurfes ist dann die Interaktion des Supervisors mit der Regelstrecke in einer Weise, die die Regelstrecke unter Vermeidung ungültiger oder unerwünschter Zustände in angestrebte Zielzustände überführt [189][147][280].

Die „Hybrid Control“ stellt einen sehr direkt auf die Problemstellung der Robotik anwendbaren Ansatz dar, die kontinuierlichen dynamischen Systeme des Roboters zur Erfüllung komplexer Aufgaben im Sinne einer übergeordneten Steuerung anzusteuern. Im Umfeld humanoider Roboter werden sie beispielsweise eingesetzt, um mehrfingrige Greifer zu kontrollieren [272] und ähnlich vielschichtige Herausforderungen, wie das bipedale Gehen [249] oder die aufgabenorientierte Bewegungssteuerung von Robotern [255], auf einer umfassenderen, abstrakten Ebene zu analysieren und umzusetzen. Über die Steuerung eines einzelnen Roboters hinausgehend werden weitere auf hybride Systeme basierende Ansätze vorgestellt, die die flexible, aufgabenbezogene Aktivierung mehrerer Einzelroboter sowie weiterer Automatisierungseinheiten in der Fertigung ermöglichen [298][190].

Insbesondere ist jedoch der Ansatz der „Supervisory Control“ dazu geeignet, in aufeinander aufbauenden Ebenen des Supervisors eine zunehmend abstraktere Sicht auf das Steuerungsproblem einzunehmen, da hier im Vergleich mit der einfachen „Hybrid Control“ eine rasche Loslösung von der konkreten Ausgangsymbolmenge der Regelstrecke bewerkstelligt werden kann. Entsprechend werden anhand der Idee der „Supervisory Control“ Steuerungen entwickelt, die aufbauend auf Steuerungsebenen für einzelne Beine die Bewegungssteuerung mehrbeiniger Roboter übernehmen [229] oder aufbauend auf Steuerungsebenen für einzelne Industrieroboter die Führung von Mehrrobotersystemen erlauben [185][273]. Desweiteren sind auf der „Supervisory Control“ basierende Ansätze bekannt, um Interaktionsfertigkeiten für humanoide Roboter bereitzustellen. Unter Einbezug der kombinierten Sensordaten einer aus mehreren Systemen bestehenden Sensorik werden komplexere Interaktionsfertigkeiten

Anthropomorphe Multi-Agentensysteme

Simulation, Analyse und Steuerung

Schlette, C.

2013, XIV, 215 S. 122 Abb., 10 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-02518-2