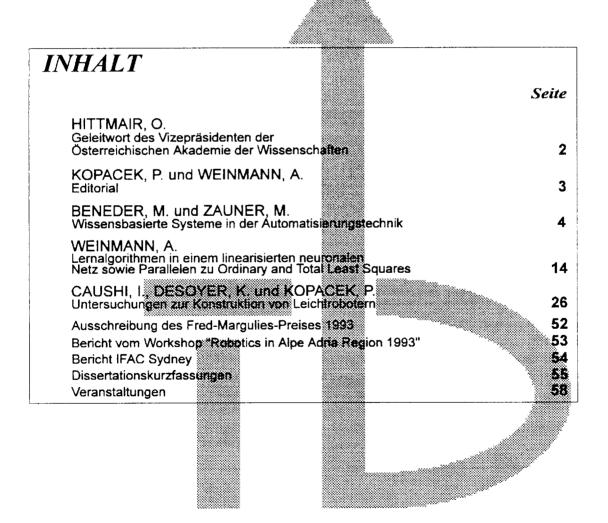


AUTOMATION AUSTRIA



Geleitwort des Vizepräsidenten der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Der IFAC-Beirat, als dessen Trägerorganisation neben dem Bundesministerium für Wisssenschaft und Forschung die Österrr. Akademie der Wissenschaften fungiert, wurde 1983 gegründet. Einer der maßgeblichen Günde für diese Gründung war, daß auf Initiative der Österreichischen Bundesregierung und der Akademie der Wissenschaften im Jahre 1979 das Generalsekretariat der "International Federation of Automatic Control - IFAC" seinen ständigen Sitz nach Laxenburg verlegt hatte.

In der Folge war es daher naheliegend, eine nationale österreichische Koordinationsstelle ins Leben zu rufen, deren Hauptaufgabe darin besteht, die auf internationaler Ebene gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik für die österreichische Industrie, und hier insbesondere für Klein- und Mittelbetriebe, nutzbar zu machen. Der IFAC-Beirat Österreich soll daher eine Brücke zwischen der IFAC und Österreich darstellen. In den nunmehr zehn Jahren seiner Tätigkeit ist der IFAC-Beirat Österreich neben der Organisation bzw. Mitorganisation von acht Automatisierungstagen, der Förderung der Teilnahme von österreichischen Wissenschaftern an IFAC-Veranstaltungen, der Mitorganisation von wissenschaftlichen Symposien und Konferenzen in Österreich sowie für die Herausgabe der Zeitschrift "Automatisierungstechnik in Österreich" verantwortlich gewesen. Diese Zeitschrift hat sich von einem vierseitigen hektographierten Blättchen über ein Nachrichtenblatt zu einem integrierenden Bestandteil einer namhaften österreichischen Fachzeitschrift entwickelt. Aufgrund dieser Entwicklung war es naheliegend, eine eigene wissenschaftliche Fachzeitschrift mit dem Titel "International Journal Automation Austria" ins Leben zu rufen. Diese aus dem Budget des IFAC-Beirates finanzierte Zeitschrift soll wie bisher aktuelle IFAC-News einem breiteren Leserkreis zugänglich machen, aber darüber hinaus hervorragende wissenschaftliche Arbeiten auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik in Österreich und im Ausland in möglichst ungekürzter Form zugänglich machen.

Im Namen der Österreichischen Akademie der Wissenschaften wünsche ich dieser neuen Zeitschrift, daß sie die gesteckten Ziele zur Gänze erreicht und daß sie sich zu einem angesehenen wissenschaftlichen Publikationsorgan entwickelt. Den Herausgebern möge der Erfolg beschieden sein, ein internationales Leserpublikum zu finden und die Mittlerrolle Österreichs in Europa auf wissenschaftlichem Gebiet zu festigen.

o.Univ.Prof.Dr.O.Hittmair

C. Hittmair

Editorial

Diese erste Nummer der nun vorliegenden Zeitschrift soll eine neue Ära im österreichischen Automatisierungsgeschehen einleiten. Österreich hat sich in den letzten Jahren zu einem international beachteten Faktor entwickelt, sind doch wesentliche Beiträge zur Automatisierung in Theorie und Praxis geleistet worden. Diese Zeitschrift versteht sich als ein internationales Forum für anwendungsorientierte oder anwendungsverdächtige Originalarbeiten mit besonderer Berücksichtigung von in Österreich gewonnenen wissenschaftlichen Forschungsergebnissen.

Im Zuge der rasanten Entwicklung der Mikroelektronik ist ein Zusammenwachsen der Fachgebiete Prozeßautomatisierung und Fertigungsautomatisierung festzustellen. Es ist daher nach unserem Wissen die erste Fachzeitschrift, welche Arbeiten aus beiden Fachgebieten publiziert. Zur Unterstützung der Herausgeber fungiert ein internationaler Editorial Board, dessen Mitgliedern bereits im voraus für ihre Arbeit gedankt sei.

Dieser wissenschaftliche Teil wird ergänzt durch Kurzfassungen von in Österreich approbierten Dissertationen, Berichten von Veranstaltungen - überwiegend der IFAC, Veranstaltungsankündigungen, Buchbesprechungen sowie eine Übersicht über neue Produkte. Österreichischen Universitäts- und Forschungsinstituten, welche auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik tätig sind, soll Gelegenheit geboten werden, sich einem nationalen und internationalen Fachpublikum darzustellen.

Die Herausgeber möchten sich auf diesem Wege bei den maßgeblichen österreichischen Stellen, insbesonders der Österreichischen Akademie der Wissenschaften sowie der Forschungssektion des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung für die finanzielle Unterstützung, den Mitgliedern des Editorial Boards für ihre Bereitschaft, diese Zeitschrift konstruktiv mitzugestalten, den Autoren für die Kooperationsbereitschaft und den Lesern für kritische Anmerkungen bedanken. Weiters wird der Hoffnung Ausdruck verliehen, daß aus den derzeit geplanten zwei Ausgaben pro Jahr recht bald eine Erweiterung auf vier pro Jahr gelingen könnte.

o.Univ.Prof.Dr. A. Weinmann

o.Univ.Prof.Dr. P. Kopacek

Wissensbasierte Systeme in der Automatisierungstechnik

M. Beneder und M. Zauner

Eingelangt: 28. Juni 1993

Kurzfassung: Der Einsatz wissensbasierter Systeme erzielt in den Automatisierungstechnik wesentliche Anwendungsbereichen der Verbesserungen in der Zuverlässigkeit und der Berechenbarkeit von Automatisierungstechnik Problemlösungsprozessen. Die grundsätzlich kontimuierliche und diskrete Problemstellungen. Der Bericht befaßt sich mit wissensbasierten Systemen für diskrete Problemstellungen und hat das Ziel, dem Leser einen Überblick in die praktische Anwendbarkeit von wissensbasierten Systemen zu geben. Dabei steht die Lösung komplexer, nicht algorithmisierbarer Problemstellungen, die durch unsicheres und sich häufig änderndes Wissen entstehen, im Vordergrund. In der Praxis ist den angebotenen Anwendungen wissensbasierter Systeme besondere Beachtung zu Oft sind die Ziele der Progamme durch konventionelle widmen. Programmiermethoden hinlänglich lösbar, und damit die Vorteile der wissensbasierten Problemlösung nicht erkennbar. Es wird dabei übersehen, daß es heute noch viele Aufgabenstellungen in der Automatisierungstechnik gibt, die mit herkömmlichen Rechnern in akzeptabler Zeit nicht lösbar sind. Diese durch (np)-vollständigen Probleme können jedoch z.B.Wissensrepräsentation mit Hilfe von neuronalen Netzen in minimalen Rechenzeiten gelöst werden.

Neben einer allgemeinen Betrachtung der Künstlichen Intelligenz und ihrer Einsetzbarkeit in der Automatisierungstechnik werden hier zwei Beispiele aus der Praxis vorgestellt. Es sind dies: Ein Diagnosesystem zur Lokalisierung von Anlagenfehlern in einer flexiblen Montagezelle und ein Beratungssystem zur Optimierung des Produktionsablaufes und Reduzierung der Einstellzeiten der Walzgerüste einer Rohrwalzstraße.

1. KÜNSTLICHE INTELLIGENZ VOM ALGORITHMUS ZUR WISSENSBASIS

Unter Intelligenz wird das Vermögen verstanden, Zusammenhänge zwischen einer Vielzahl von Faktoren auf kürzestem Wege zu erkennen. Intelligenz ist demnach die Fähigkeit, den Besitz an Wissen, das in Datenform oder in Kombinationen vorliegen kann, zur Gewinnung neuer Erkenntnisse zu verarbeiten. Der wesentliche Aspekt dabei ist das Gewinnen neuer Erkenntnisse. Wissen in Form von Daten alleine bedeutet noch keine Intelligenz. Allerdings gibt es keine Intelligenz ohne Wissen.

Mit den Methoden der Künstlichen Intelligenz können heute folgende intelligente Fähigkeiten in Automatisierungseinrichtungen übertragen werden:

- Bildung von Inferenzen,
- das Speichern von Zuständen, Eigenschaften, usw.,
- Muster- und Zeichenerkennung.
- Abstaktion, Generalisierung und Aggregation,
- automatisches Problemlösen,

- fuzzy-basierte Entscheidungshilfe (DSS),
- selbständige Lernfähigkeit.

Die Intelligenz der digitalen Informationsverarbeitung wird insofern eingeschränkt, als sich die Wissensverarbeitung nur mit dem formalisierbaren und manipulierbaren Teil von Intelligenz befaßt. Das Ziel des Einsatzes wissensbasierter Systeme liegt daher in der Lösung nichtdeterministischer und unpräziser Problemstellungen. Anwendungsgebiete finden sich in der diskreten Automatisierungstechnik und deren Einsatzgebieten wie z.B. der Sensorik, Robotik und in der Medizin.

2. KÜNSTLICHE INTELLIGENZ (KI) UND DEREN ANWENDUNGSBEREICHE

Die Methoden der KI basieren auf Methoden der Informatik, insbesonders auf Methoden der nichtnumerischen Datenverarbeitung. Auch verwandte Wissenschaften wie Formale Logik und Diskrete Mathematik liegen ihr zugrunde. KI - Problemlösungsmethoden sind Suchstrategien in einem zustandsorientierten Problemraum mit vielen Lösungsalternativen (z.B. A*-Algorithmen in *und/oder* Suchbäumen). Durch die Kopplung dieser Ansätze entsteht ein mehrstufiges hierarchisches Lösungsschema (vgl. Abbildung 1).

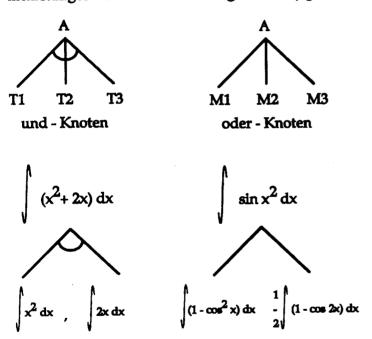


Abb. 1: Lösungsmöglichkeiten in und/oder Suchbäumen

Die angewandten Modellierungsmethoden hängen stark von der Aufbereitung und Strukturierung der Problemstellung ab. Um das vollständige Überprüfen aller möglichen Kombinationen zu vermeiden wird die Lösungsmenge eingeschränkt durch

- Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten p(i) der Lösungspfade,
- Default-Werte d(i) (Voreinstellungen, die nur bei Bedarf geändert werden),
- Bildung von zu lösenden Teilproblemen (Modularisierung durch Splitten).

Die Anwendungsgebiete der KI sind vorwiegend solche bei denen die herkömmlichen Methoden der numerischen Datenverarbeitung versagen. Das Gebiet des Sprachverstehens beschäftigt sich mit der Kommunikation in natürlicher Sprache (Wort und Schrift) mit dem Computer. Die Forschung auf dem Bereich der Wahrnehmung beschäftigt sich mit der Nachahmung der Funktion der menschlichen Sinne. Schwerpunkte liegen im Sehen (Vision), Hören (Speech understanding) und Fühlen (Tactile Sensing). Der Bau intelligenter

Handhabungssysteme ist Ziel der Robotik. Für die Flexibilität von Robotern sind neben der Programmierbarkeit besonders ihre Ausstattung mit Fähigkeiten auf den Bereichen Bildverarbeitung und Sensorik wichtig. Damit können Roboter ihre Umwelt wahrnehmen und auf sie reagieren. Bei Neuronalen Netzen wird intelligentes Verhalten durch eine Vielzahl einfacher Bausteine, welche hochgradig vernetzt sind, erreicht. Sie zeichnen sich durch eine rasche Lernfähigkeit und Fehlertoleranz aus. In der Mathematik werden unter dem Gebiet Theorembeweisen Wege zur automatischen Herleitung und Verifikation von logischen Formeln gesucht. Beim Automatischen Programmieren werden ausgehend von einer formalen Spezifikation, Beispielen oder einem natürlichsprachlichen Dialog Programme automatisch generiert. Expertensysteme (XPS) dienen der Problemlösung mit Hilfe wissensbasierter Methoden und Techniken.

Bei den Problemklassen der KI handelt es sich grundsätzlich um Analyse- und Syntheseaufgaben. Bei Analyseaufgaben, z.B. Diagnose und Überwachung, werden für einen vorliegenden Tatbestand eine oder mehrere Aussagen gefunden. Bei Syntheseaufgaben z.B. Planungs-, Entwurfs-, und Konfigurierungsproblemen, wird eine Menge von Einzelteilen zeitlich und örtlich kombiniert. Diese Problemstellungen lassen sich als Abhängigkeitsgraphen (Netzwerke, Zustandsgraphen) aufbereiten, d.h. die Knoten (Zustände) und Kanten (Übergangsbedingungen) können explizit auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen formuliert werden.

3. TYPEN, AUFBAU UND QUALITÄT VON EXPERTENSYSTEMEN

Expertensysteme stellen eine wesentliche Anwendung der wissensbasierten Systeme dar. Sie repräsentieren das vertiefte Fachwissen von Experten bzw. von ganzen Expertenteams, und sind in der Lage, selbständig die Entscheidungen dieser Experten ganz bzw. teilweise zu erarbeiten. Das "Wissen" eines solchen Systems setzt sich aus Fakten und Erfahrungswerten eines speziellen Anwendungsbereiches zusammen. Die Fakten bilden sich aus Informationen, die allgemein zugänglich, weit verbreitet und von den Fachexperten allgemein anerkannt sind. Die Erfahrungswerte sind zumeist wenig bekannte, schlecht erfaßbare Regeln, die ein "richtiges Abwägen" verlangen.

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Typen von Expertensystemen, die spezialisierten (dedizierten) und die offenen Expertensysteme. Während dedizierte Expertensysteme in einem speziellen Einsatzbereich Entscheidungshilfen darstellen, sollen offene Expertensysteme unabhängig vom Einsatzbereich aufgebaut werden können. Der strukturelle Programmaufbau von Expertensystemen unterscheidet sich grundlegend vom Programmaufbau konventioneller EDV-Applikationen. Im folgenden werden die Komponenten eines Expertensystems kurz angeführt. Für die detaillierte Behandlung der einzelnen Komponenten sei auf die Fachliteratur verwiesen. Eine Klassifizierung der Expertensysteme erfolgt nach der Art der Wissensrepräsentation und in Abhängigkeit von der angewandten Inferenztechnik. Die Komponenten (vgl. Abbildung 2) von Expertensystemen umfassen:

Dialogkomponente

Wissen erfragen und Probleme erfassen sowie Lösungsbereiche einschränken.

Wissenserwerbskomponente

Wissen erfassen (Mensch/Maschine, Maschine/Maschine oder durch maschinelles Lernen) und in geeigneter Form in der Wissensbasis ablegen.

Wissenskomponente

Im Idealfall werden in einer Datenbank Objekte, Fakten und Regeln zur Beschreibung des Weltmodells mit ihren Abhängigkeiten und Attributen gespeichert. Wissensrepräsentationstechniken unterteilen sich in logische

(Aussagen- und Prädikatenlogik) und strukturierte Wissensrepräsentationsformen (objektorientierte Wissensrepräsentation, semantische Netze und Framestrukturen) sowie Produktionsregelsysteme, bestehend aus Regel- oder Wissensbasis, dynamischer Datenbasis und einem Kontroll- und Ableitungssystem.

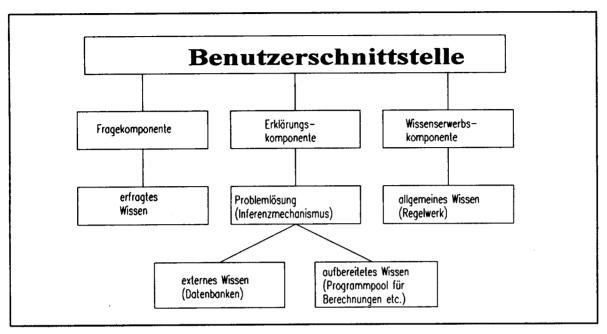


Abb. 2: Komponenten eines Expertensystems

Inferenzkomponente

Verwaltung und Kontrolle der Regeln für die Schlußfolgerungen (Inferenztechniken), sodaß ein geeigneter Lösungsraum ausgewählt und abgearbeitet (Suchstrategien) werden kann (evtl. in Verbindung mit heuristischem Wissen). Abhängig von der Inferenztechnik unterscheidet man Diagnose- (Rückwärtsverkettung: vom Symptom zur Ursache) und Planungssysteme (Vorwärtsverkettung: von der Fehlersituation zu einer geeigneten Zielsituation).

Erklärungskomponente

Darstellung der Zwischenergebnisse bei der Problemlösung. Die Erklärungskomponente sollte einen komfortablen Dialog mit dem Benutzer gestatten.

Die Vorteile wissensbasierter Systeme, i.s. Expertensysteme, gegenüber konventionellen Programmen liegen darin, daß beschreibendes (deklaratives) Systemwissen getrennt von der Ablauflogik eines Programmes verwaltet wird. Die Entscheidungswege der Ablauflogik werden beim Expertensystem erst zur Laufzeit in Abhängigkeit von der Problemdiese bei der konventionellen, prozeduralen lösungssituation festgelegt, während Programmierung in den Algorithmus eingebunden sind. Da jedoch gerade die Bereiche der Automatisierungstechnik oftmaligen Änderungen, sei es durch neue Erkenntnisse, weiterentwickelte Technologien oder Marktanpassungen unterliegen, erscheint diese Art der Daten- und Wissensverwaltung für Know-How Bereiche und intuitive Wissensanwendungen, oft aufgrund unüberschaubarer, komplexer Zusammenhänge, prädestiniert. Erweiterungen der Wissensbasis werden in Expertensystemen ohne Änderungen der Programmstrukturen durchgeführt und bieten zudem den Vorteil, auch unsicheres und unvollständiges Wissen zu verarbeiten. In diesem Fall werden jedoch hohe Ansprüche an die Inferenzkomponente des Expertensystems gestellt.

Die Qualität der Inferenzkomponente ist auch ausschlaggebend für das Reaktionsverhalten bei der Problemlösung. Da Expertensysteme im Einsatz mehrere tausend Regeln, hunderte Objekte und viele Abhängigkeiten verwalten, wird durch den Einsatz von Metawissen versucht, das Antwortzeitverhalten durch frühzeitige Einschränkung des Lösungsraumes in Verbindung mit geeigneten Ablauf- und Kontrollstrategien zu reduzieren. Die Reaktionszeiten von Expertensystemen sind heute deren größte Schwachstelle. Die bereits realisierten Anwendungen und Prototypen zeigen, daß es sinnvoll ist, bei der Entwicklung und beim Einsatz von Expertensystemen deklaratives Wissen mit prozeduralem Wissen zu vereinen, um die Vorteile beider Problemlösungsverfahren zu nutzen. Expertensysteme sind heute meist Prototypen- und Spezialanwendungen. Sie bieten die Möglichkeiten einer Synthese von algorithmisierbaren Problemen (z.B. aus dem Bereich des Operations Research) und der wissensbasierten Lösung komplexer Aufgaben aus Diagnose und Planung.

Gegen den praktischen Einsatz Künstlicher Intelligenz sprechen heute vor allem hohe Echtzeitanforderungen der Problemstellung oder eine zu große Komplexität der Problemstellung aufgrund arithmetischer Berechnungen. Die durch die Interpretation der Regeln zur Laufzeit meist sehr langen Reaktionszeiten führen häufig zu Akzeptanzproblemen. Eine Kombination wissensbasierter Methoden mit konventionellen Programmen führt hier zu den besten Ergebnissen.

4. KÜNSTLICHE INTELLIGENZ IN DER AUTOMATISIERUNGSTECHNIK - STAND DER TECHNIK

In den folgenden speziellen Bereichen der Automatisierungstechnik kann Künstliche Intelligenz sinnvoll eingesetzt werden:

- Wissensbasierte Technologie- und Arbeitsplanung
- Wissensbasiert unterstützte Produktionsüberwachung
- Prozeßnahe Diagnosefunktionen (Diagnose technischer Bauteile)
- Wissensbasierte Werkstattsteuerung
- Robotik
- Wissensbasierte Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung
- Wissensbasierte Prozeßoptimierung (Prozeßleittechnik)

Anwendungen von Expertensystemen können als einfache Stand-alone Systeme, ohne direkten Kontakt zum reellen Prozeß, realisiert werden. Die notwendigen Inputdaten sind dabei händisch einzugeben oder zu simulieren. Im Falle eines funktionsintegrierten Systemes wird das XPS eingesetzt um Funktionen unabhängiger Systeme (z.B. des PPS) zu verbinden, dabei werden die bestehenden Softwarepakete weiter genutzt. Systemintegrierte Konzepte schließlich bedingen die Integration von XPSen verschiedener CIM-Komponenten.

Wenn man bedenkt, daß Expertensysteme und andere Anwendungen der Künstlichen Intelligenz in der Automatisierung zum Einsatz kommen, so ist grundsätzlich davon auszugehen, daß die Problemlösung bzw. die Generierung des Lösungsvorschlages innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls erfolgen muß. So sind z.B. Expertensysteme in der Qualitätssicherung zweckmäßigerweise an Prüfstände gekoppelt und somit taktzeitgebunden. Expertensysteme in der Arbeitsplanung müssen die schwer algorithmisierbaren Vorgänge für die Erstellung der korrekten Arbeitspläne unter Berücksichtigung allfälliger Alternativen und Produktions- und Betriebsmittelzustände abbilden und arbeiten sehr eng mit den Bereichen PPS und NC-Programmierung zusammen. Es werden somit umfangreiche Anforderungen an die Bearbeitung von Daten gestellt. Im Bereich der Prozeßoptimierung sind in der Regel geringe Datenvolumen vorhanden, diese müssen jedoch in Echtzeit bearbeitet werden. Die Bereiche der Technologie- und Arbeitsplanung müssen umfangreiche Datenmengen

verarbeiten, jedoch sind die Anforderungen an eine echtzeitfähige Datenverarbeitung in der Regel nicht mehr gegeben.

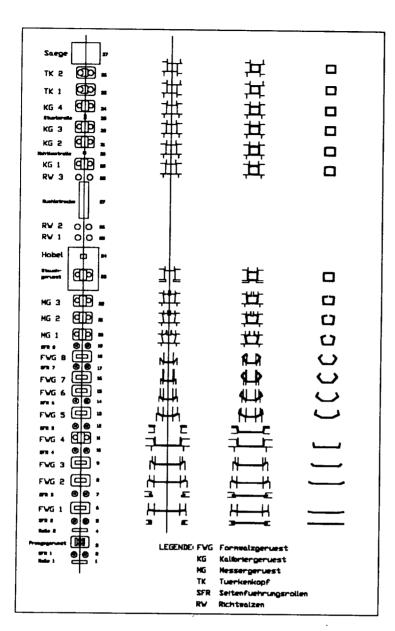
Eine streng algorithmische Vorgehensweise führt bei vielen Problemfällen zu der Situation, daß vorhandene Widersprüche nicht aufgelöst werden können und eventuell zu einer Nichtentscheidbarkeit führen. Bei der wissensbasierten Planung können Alternativen generiert werden, die mit heuristischem Wissen bewertet werden. Unerfüllbare Teilziele können, nachdem der Grund der Nichterfüllbarkeit gefunden wurde, aus dem Suchraum der komplexe sagen. daß läßt sich Grundsätzlich entfernt werden. Alternativen produktionstechnische Planungsaufgaben mit häufigen Änderungen des Probleminhaltes besonders gut für den Einsatz wissensbasierter Systeme geeignet sind (Arbeitsplanung, Fehlerdiagnosen, Robotik).

Von einer allgemeinen Verfügbarkeit dieser neuen Technologie ist jedoch nicht zu sprechen. Der Einsatz Wissensbasierter Systeme beschränkt sich derzeit auf einige wenige Laboranwendungen und Prototypen in der Industrie. Derzeit ist es noch nicht möglich Softwarepakete für ein beliebiges Einsatzgebiet zu erwerben, die angebotenen Lösungen sind sehr speziell auf ein bestimmte Anwendung zugeschnitten. Ein weiterer Nachteil sind die relativ hohen Kosten für die Software und die notwendige, entsprechend leistungsfähige Hardwareumgebung. Darüberhinaus sind die Erwartungen der Anwender oftmals als übertrieben zu bezeichnen, nicht zuletzt auch aufgrund allzu beschönigender Produktankündigungen.

Nach der Phase der Grundlagenforschung und einigen Laboranwendungen ist es nun an der Zeit die Eignung der Methoden der Künstlichen Intelligenz für praktische Anwendungen zu demonstrieren. Im folgenden werden zwei in der Industrie realisierte Anwendungen wissensbasierter Systeme vorgestellt.

5. WISSENSBASIERTE AUTOMATISIERUNG EINER ROHRWALZSTRASSE

In einem Rohrwalzwerk wird Bandstahl in verschiedenen Stärken, Materialien und Breiten zu Rohren mit unterschiedlicher Querschnittgeometrie geformt und verschweißt. Die Umformung erfolgt in Gerüsten (bis zu 32 Stück) mit verschiedensten Einstellmöglichkeiten (vgl. Abbildung 3). Zwischen Form- und Nachformgerüsten wird das Profil durch eine Lichtbogenschweißung geschlossen und der dabei entstehende Schweißwulst abgehobelt. Probleme treten bei den Einstell- und Justierarbeiten der Walzgerüste auf, wenn von einer Profiltype oder -dimension auf eine andere umgerüstet wird. Es erfordert viel Erfahrung und Geschick der Anlagenbediener, vorgeschriebene Toleranzen ohne großen Zeitaufwand einzuhalten. Im Normalfall sind mehrere Nachstellarbeiten erforderlich. Dies ist deshalb unerwünscht, da das Band probeweise auch während den Justierarbeiten läuft und in dieser Zeit, zusätzlich zum Produktionsstillstand, zwangsweise Ausschuß produziert wird.



Die Anwendung der Methoden Künstlicher Intelligenz wurde erforderlich da eine Modellbildung exakt nicht möglich war und Näherungen zu ungenaue Ergebnisse lieferten. Bei der Realisierung wurde mit Hilfe verschiedener Methoden der Wissensakquisition Expertenwissen der Bedienmannschaft gesammelt und in Form von Regeln dargestellt. Die so gewonnenen Regeln bilden zusammen mit den Erkenntnissen aus Beobachtungen den qualitativen Teil der Wissensbasis. Mit diesem Wissen können Fehlerursachen aufgefunden werden, die maßgeblich für lange Justierzeiten sind

Abb. 3: Schematische Darstellung einer Formrohrstraße

Da die Zusammenhänge bei einem Profilierprozeß aufgrund der großen Anzahl an Einflußgrößen sehr komplex sind, wurde darauf verzichtet, die quantitative Information zur Korrektur eines Fehlers auf Basis eines mathematischen Modells in das System einzubinden. Die zu verändernden Gerüste und der Betrag der Stellgrößen wird stattdessen aus Erfahrungsdaten bereits erfolgreicher Verstellungen abgeleitet. Dazu wurde Lernkomponente entwickelt und implementiert, die ausgehend von Beispielen aus der Produktion, selbstständig eine quantitative Wissensbasis aufbaut. Diese besteht aus Bewertungsfaktoren. die zur Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einflußgrößen dienen und bildet die Ergänzung zur regelbasierten (qualitativen) Wissensbasis. Diese Faktoren beschreiben das bearbeitete Material, die Gerüste und die Fehler. Der qualitative Output des Regelsystems wird mit den Bewertungsfaktoren multipliziert. Aus der Beobachtung der Häufigkeit der aus einem bestimmten Verstellvorgang resultierenden Fehler (also eine weitere Verstellung notwendig ist) kann eine neue Bewertungszahl errechnet werden. Fehlerfreie Versuche erhalten so laufend eine bessere Bewertung, während fehlerhafte Versuche schlechter bewertet werden. Die strikte Trennung von Regelwissen und Bewertungsfaktoren erlaubt eine einfache Anpassung der Software an Veränderungen im Prozeß. Nach der Lernphase werden materialabhängige Faktoren wie unbekannte Elastizitäten und Temperaturwerte in den generierten Vorschlägen berücksichtigt. Im Laufe der Zeit sollen

die Vorschläge so ausgereift sein, daß nach Umstellung auf eine andere Profildimension maximal ein Nachstellvorgang erforderlich ist.

Der regelbasierte Teil (qualitatives Wissen) des Beratungssystems wurde anfänglich in einer logischen Programmiersprache (FORLOG) erstellt. Zur Realisierung der Lernkomponente diente eine prozedurale Sprache (C). Aus Gründen der Laufzeit und Benutzerfreundlichkeit wurde der ursprünglich in FORLOG programmierte Teil des Beratungssystems letztendlich auch in C, aber trotzdem nach den Grundsätzen der logischen Programmierung umgesetzt.

6. Ein Beratungssystem zur Störungssuche in einer flexiblen Montagezelle

In Zusammenarbeit mit der TU-Wien und der Universität Linz wurde ein "low cost" CIM-Konzept zur Herstellung von Primärleistungsteilen von Schweißtransformatoren eines österreichischen Mittelbetriebes erstellt. Dazu wurde auf der CAM Ebene eine roboterbestückte Montagezelle entwickelt (vgl. Abb. 4). Das Kernstück der Anlage bilden zwei Roboter zur Montage (IGM, ABB), welche mit verschiedenen Werkzeugen (Schrauber, Greifer, Lötgerät, ...) bestückt werden. Verschiedene Magazine aus denen die Bauteile abgeholt werden, sowie Wendelförderer zur Versorgung der Schrauber ergänzen die eigentliche Montagestation. Der Zu- und Abtransport der zu bearbeitenden Bauteile erfolgt über ein Fördersystem, in welches auch noch eine Siebdruckanlage zur Vorbehandlung der ankommenden Werkstücke integriert ist.

Die Anlage ist durch eine Person bedienbar, welche sowohl für die Magazinierung der Bauteile wie auch für die Behebung von auftretenden Fehlern verantwortlich ist. Das Beschicken der Magazine, das Be- und Entladen der Anlage mit Kühlkörpern und die Adaptionen für den jeweiligen Schweißtransformatortyp, sofern sie unbedingt notwendig sind, erfolgen händisch, ansonsten arbeitet die Anlage vollautomatisch. Angesteuert werden die einzelnen Komponenten über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (B&R), welche mit einem PC verbunden ist. Auf dem PC läuft eine Steuersoftware, über die der Anlagenbetreuer das System bedienen kann. Das Steuerungsprogramm auf dem PC übernimmt über eine serielle Leitung laufend den Zustand der gesamten Anlage aus der SPS und setzt entsprechende Aktionen (neue Programme laden, Benutzereingriffe anfordern, ...).

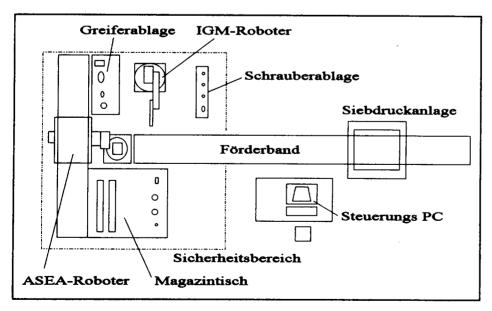


Abb. 4: Montagezelle und Peripherie

Als Ergänzung zum Steuerungsprogramm wurde ein System zur Diagnose von Anlagenfehlern erstellt. Ziel dieses Beratungssystems ist es, mit der Anlage weniger vertraute Bedienungspersonen in die Lage zu versetzen, wirksame Maßnahmen zur Bekämpfung von auftretenden Fehlern zu treffen. Das wissensbasierte System läuft auf dem bereits vorhandenen Steuerungs - PC und steht bei auftretenden Fehlern zur Verfügung. Über die Auswertung des aktuellen Anlagenstatus und Fragen an den Anlagenbediener werden die Fehlerursachen bestimmt und anschließend ein Weg zur Behebung dieser Störung vorgeschlagen. Neben der Unterstützung bei der Behebung von Anlagenfehlern, ist durch Simulation verschiedener Zustände der Montageanlage auch ein Einsatz des wissensbasierten Systems zum Zwecke der Mitarbeiterschulung möglich.

Da der Steuerrechner in der Fertigungshalle steht, wurde bewußt auf aufwendige und teure Hardware verzichtet. Die Verwendung von Windows zur Realisierung einer ausgefeilten Benutzeroberfläche war auf dem vorgegebenen Zielrechner nicht möglich. Der Einsatz einer Maus war wegen der oft staubigen und öligen Umgebung in einer Montagehalle nicht zu empfehlen. Besonderer Wert wurde auf einen stabilen Programmablauf und eine unkomplizierte Bedienung gelegt. Die Implementierung des Diagnoseprogrammes erfolgte aus Laufzeitgründen in der Programmiersprache "C".

Bei der Realisierung des Beratungssystems wurde das Expertenwissen des Fachpersonals mit Hilfe von gezielten Befragungen und des begleitenden Einsatzes von Formularen gesammelt. Weiteres Wissen konnte aus Fehlerprotokollen der Montageanlage gewonnen und anschließend in Form von Regeln dargestellt werden. Die Wissensbasis wird von den Anlagenbetreuern selbst ergänzt und gewartet. Damit ist eine Adaptierung des Diagnosemoduls bei Erweiterungen in der Funktionalität der Montagezelle durchführbar. Bei ersten praktischen Versuchen zeigte sich eine gute Übereinstimmung der vom System erstellten Diagnosen mit denen der Experten.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der heutige Stand der Technik führt zu den folgenden Beschränkungen beim Einsatz von Expertensystemen:

- Wissen nur in einem engen Fachbereich
- Fragiles Verhalten an den Bereichsgrenzen
- Begrenzte Wissensrepräsentationssprache
- Begrenzte Ein- und Ausgabefähigkeiten
- Begrenzte Erklärungsfähigkeit
- Sehr elementare Wissenserwerbsfähigkeiten

Fertige Standardexpertensysteme im Bereich der Automatisierungstechnik sind noch nicht erhältlich. Prädestiniert sind Standardexpertensysteme grundsätzlich überall dort, wo allgemeingültiges Wissen zum Einsatz kommt (z.B. Werkstattsteuerung, Einkauf). Dedizierte Expertensystemanwendungen werden speziell die Analyse und Auswertung der Technologiedaten und der auftragsspezifischen Rahmenbedingungen unterstützen, da dieses erfahrungsbedingtes Spezialwissen sehr schwer algorithmisierbar ist. Wissensbasierte Planungssysteme sind im Vergleich zu den anderen Kategorien von Expertensystemen am häufigsten im industriellen Einsatz. Korrekterweise muß erwähnt werden, daß die meisten industriellen Planungssysteme nur "Pseudo-Planungssysteme" sind, da deren Aufbau auf ein Diagnoseproblem reduziert ist. D.h. alle Zwischenschritte des Planungssystems müssen vorher bekannt sein, das Expertensystem führt die Auswahl der geeigneten Zwischenschritte durch. Die eigentliche Problemlösung derartiger Planungsexpertensysteme könnte auch mit traditionellen Methoden des Operations Research gelöst werden. Planungsexpertensysteme

sollten mittels dynamischer Generierung von neuen Zwischenzielen zu einem potentiellen Endzustand kommen. Die wissensbasierte Diagnose (statistische, modellbasierte oder assoziative) setzt voraus, daß sowohl die Fehlerzustände, die Symptome und die Zwischenschritte zur Verdachtsgenerierung und -verdichtung vorhanden sind.

Die Einsatzgebiete der Expertensysteme in der Automatisierungstechnik reichen von der wissensbasierten Arbeitsplanerstellung bis zur Bilderkennung und Robotik. In CIM-Systemen werden Expertensysteme gemeinsam mit konventionellen Programmen Entscheidungen unterstützen und Aufgaben lösen und so die Vorteile beider Konzepte vereinen.

Obwohl der Einsatz von KI zu den strategischen Unternehmenszielen gehört, ist bereits heute eine objektive Betrachtung der Probleme und deren Strukturierung durchzuführen und eine Integration in das Gesamtunternehmenskonzept unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu prüfen.

8. LITERATUR

Behrendt, R. (Hrsg.) "Angewandte Wissensverarbeitung. Die Expertensystemtechnologie erobert die Informationsverarbeitung" Oldenbourg München 1990

Beneder, M. "Ein Expertensystem zur Diagnose von Maschinenfehlern in der Fertigung von Schweißtransformatorbauteilen", Wissenschaftliche Schriftenreihe Band 3, SAT Krems 1992

Gottlob, G.; Frühwirth, Th.; Horn, W. "Expertensysteme" Springer Wien 1990

Halmschlager, G. "Wissensbasierte Automatisierung von Rohrwalzstraßen", Wissenschaftliche Schriftenreihe Band 1, SAT Krems 1992

Harmon, P.; King, D. "Expertensysteme in der Praxis: Perspektiven, Werkzeuge, Erfahrungen" Oldenbourg München 1989

Kopacek, P.; Halmschlager, G.; Ambrojewitsch, V. "Decision supported systems and their industrial applications", "IFAC- Workshop on Intelligence Manufacturing Systems", Dearborn, Michigan, Okt. 1992, Pergammon Press, S. 177 - 181

Luger, G., F.; Stubblefield, W., A. "Artificial intelligence and the design of expert systems" Benjamin/Cummings Publishing, Inc. California 1989

Mertens, P. "Expertensysteme in der Produktion: Praxisbeispiele aus Diagnose und Planung" Oldenbourg München 1990

Pritschow, G.; Spur, G.; Weck, M. (Hrsg.) "Künstliche Intelligenz in der Fertigungstechnik" Hanser München 1989

Puppe, F. "Diagnostisches Problemlösen mit Expertensystemen" Springer Berlin 1987

Rich, E. "KI-Einführung und Anwendungen" McGraw-Hill New York 1988

Stender, J. "Wissenserhebung und -strukturierung in Expertensystemen", Markt und Technik, Haar bei München 1989

Winston, P., H. "Künstliche Intelligenz" Addison-Wesley Bonn 1987

Lusti, M. "Wissensbasierte Systeme" B*I*, Wissenschaftsverlag, Reihe Informatik

Lunze, J. "Wissensbasierte Systeme" msr, Berlin 30

Lernalgorithmen in einem linearisierten neuronalen Netz sowie Parallelen zu Ordinary und Total Least Squares

Alexander Weinmann ÖVE, Senior Member IEEE

Eingelangt: 14. Juni 1993

<u>Kurzfassung:</u> Für künstliche neuronale Netze werden üblicherweise nichtlineare Funktionen $f_A(\cdot)$ als Aktivierungsfunktion verwendet. Für kleine Änderungen im Eingangs-Ausgangsmuster drängt sich die Frage nach der Linearisierung auf, nach stückweise linearen und nach quadratischen Näherungen sowie nach der Verwandtschaft zu klassischen Aufgaben und Lösungen der Approximationsmathematik wie Ordinary Least Squares und Total Least Squares.

1 Einleitung

In künstlichen neuronalen Netzen wird die von biologischen Systemen bekannte Informationsübertragung und -bearbeitung nachgeahmt.

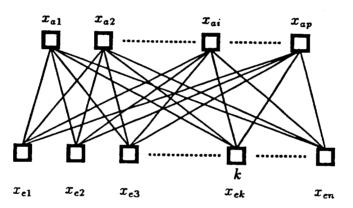


Abbildung 1: Zweischichtmodell

Das dabei nachgebildete Kalkül zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen x_{ek} und x_{ai} eines Zweischichtmodells nach Abb. 1. (mit k und i als laufendem Index) lautet dabei

$$x_{ai} = f_A(\sum_k^n w_{ik} x_{ek}) .$$
(1)

In obgenannter Gleichung sind w_{ik} Gewichtsfaktoren, mit der die Eingangsgröße x_{ek} multipliziert wird, um über alle Eingänge k summiert und über die Aktivierungsfunktion $f_A(\cdot)$ die i-te Komponente des Ausgangs zu begründen.

2 Lineare und linearisierte Modelle

Die Gesamtheit der Eingangs- und Ausgangskomponente wird in einen Eingangs- bzw. Ausgangsvektor x_e bzw. x_a zusammengefaßt.

Das Zweischichtmodell der Abb. 1. kann unter sinngemäßem Fortschreiten auf ein Mehrschichtenmodell erweitert werden, wie es in Abb. 2. gezeigt ist.

Unabhängig von der Anzahl der Schichten kann bei vorgegebenen Zusammenhängen zwischen den Eingangs- und Ausgangsvektoren durch Anpassung der Gewichte w_{ik} eine

optimale Approximation der Eingangs/Ausgangsbeziehung durch das neuronale Netzwerk erwirkt werden.

Die zu erlernenden Zusammenhänge können statische Kennlinien betreffen oder auch dynamische Beziehungen, wie sie vorzugsweise durch Differenzengleichungen von Prozessen bestimmt werden. Das Erlernen betrifft dann die Ermittlung der Koeffizienten der Differenzengleichung; das neuronale Netz dient der Identifikation.

Im Appendix A wird die Funktion $f_A(\cdot)$ auf eine lineare spezialisiert. Gegeben seien mehrere diskrete Eingangsfolgen x_{ekm} aus je n Elementen. Je Folge läuft der Index k von 1 bis n. Der Index m variiert über alle Folgen von 1 bis m. Je Folge sei ein Ausgang y_m von dem Netz zu approximieren, und zwar aus Gründen der einfachen Überschaubarkeit nach einem quadratischen Gütekriterium in Gl. (13). Der Vektor der zugehörigen optimalen Gewichte w_k wird zur Gl. (16) hergeleitet und ist wie folgt gegeben

$$\mathbf{w} = \left(\sum_{m=1}^{M} \mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^{T}\right)^{-1} \left(\sum_{m=1}^{M} y_{m} \mathbf{x}_{em}\right) \qquad M > 1.$$
 (2)

Für p Ausgänge lautet das korrespondierende Ergebnis zu Gl. (20).

Aufgrund der linearen Struktur und des quadratischen Gütemaßes ist nicht weiter unerwartet, daß die Ergebnisse mit denen der *Ordinary-least-squares-Approximation* identisch sind.

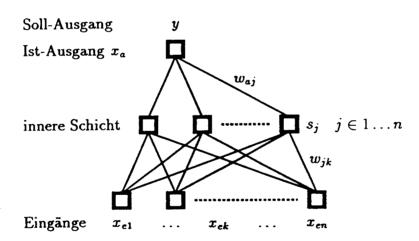


Abbildung 2: Dreischichtmodell

Das Dreischichtmodell nach Abb. 2 ist in Appendix B behandelt. Dabei sind — der hinzugekommenen inneren Schicht s_j entsprechend — Beziehungen zwischen Eingangs- und innerer Schicht sowie zwischen innerer und Ausgangsschicht herzustellen. Zufolge der Kaskadierung linearer Strukturen erhält man zwar eine höhere Gestaltungsvielfalt aber kein prinzipiell neues Ergebnis, das nicht schon mit Gl. (20) erfaßt werden könnte.

3 Quadratische und stückweise lineare Aktivierungsfunktion

Für allgemeine nichtlineare Funktionen $f_A(\cdot)$ führten die Bedingungen für optimale Approximation aus Nullsetzen der ersten Ableitung nach dem Gewichtsfaktoren w_l auf Gl.(29), siehe Appendix C. Die Bedingung läßt sich nur für spezielle Annahmen von $f_A(\cdot)$, für quadratische oder stückweise lineare, bis zu gewissem Grad vereinfachen.

4 Beteiligung der Eingänge an der Fehlerdefinition

In den vorhergehenden Abschnitten ist ein neuronales Netz konzipiert worden, dessen Eingangswerte dem zu approximierenden Eingangsmuster gleichgesetzt werden und dessen Ausgänge an das Ausgangsmuster bestmöglich herangeführt werden. Dieser Gedanke wird nun erweitert, und zwar dadurch, daß bei den Eingangswerten und dem Eingangsmuster Toleranzen zugelassen werden. Das Eingangs- bzw. Ausgangsmuster wird z_{em} bzw. y_m benannt; x_{em} ist nur mehr Zwischenträger. Die Optimierung hat somit über w und x_{em} zu erfolgen. Das Ergebnis der Herleitung aus Appendix D, siehe Gln. (46) und (49), lautet

$$\mathbf{X}_{e}\mathbf{y} = \mathbf{X}_{e}\mathbf{X}_{e}^{T}\mathbf{w} \qquad \mathbf{X}_{e} \stackrel{\triangle}{=} (\mathbf{x}_{e1} : \mathbf{x}_{e2} : \dots : \mathbf{x}_{em} : \dots : \mathbf{x}_{eM})$$
(3)

$$\mathbf{x}_{em} = (\beta \mathbf{I} + \mathbf{w}\mathbf{w}^T)^{-1}(y_m \mathbf{w} + \beta \mathbf{z}_{em}) \quad \forall m \in 1 \dots M .$$
 (4)

Ihre gemeinsame Lösung aus wechselseitigem Einsetzen ist das erstrebte Resultat.

Ein Konvergenzbeweis ist dabei nicht erbracht. Eine Vielzahl von Beispielen und Initialwerten zeigte aber einen erfolgreichen Ablauf.

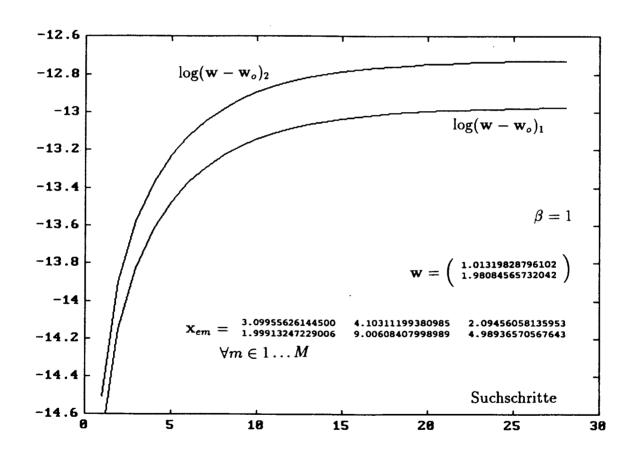


Abbildung 3: Einschwingvorgang der Komponenten von $w - w_0$

Beispiel: Zwei Eingänge, ein Ausgang, bestmögliche Approximation von drei Eingangsmustern. n = 2, p = 1, M = 3.

$$\mathbf{z}_{e1} = \begin{pmatrix} 3,1\\2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{z}_{e2} = \begin{pmatrix} 4,1\\9 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{z}_{e2} = \begin{pmatrix} 2,1\\5 \end{pmatrix}, \quad y_1 = 7,1, \quad y_2 = 22, \quad y_3 = 12.$$
 (5)

$$\mathbf{Z}_e \stackrel{\triangle}{=} (\mathbf{z}_{e1} : \mathbf{z}_{e2} : \mathbf{z}_{e3}) \quad \rightsquigarrow \quad \text{Ordinary Least Square} \quad \mathbf{w}_o = (\mathbf{Z}_e \mathbf{Z}_e^T)^{-1} \mathbf{Z}_e \mathbf{y} . \quad (6)$$

Die Abb. 3 zeigt ausgehend von w_o das Konvergenzverhalten aus dem abwechselnden Lösen von Gl.(46) und (49), und zwar hinsichtlich des Logarithmus von $w - w_o$ komponentenweise über 28 Suchschritte.

Die rekursive Formulierung ohne Gewichtung ist in Appendix E, die gewichtet rekursive in Appendix F angegeben. Die rekursiven Formulierungen ergeben sich aus der Zerlegung der Aufgabe in eine erste Teilaufgabe mit Lösung nach k-1 Teilschritten, auf deren Ergebnis die Hinzunahme eines k-ten Teilschritts folgt¹. Das Resultat unter Einschluß des k-ten Schritts wird auf dem Resultat aus den vorangegangenen k-1 Teilschritten aufgebaut.

Die Analogie zu den Ergebnissen der Total Least Squares Methode wird in Appendix G dargestellt.

5 Anwendung auf die Identifikation von Eingrößenregelstrecken

Um die Übertragungsfunktion zwischen Stellgrößeneingang u(k) und Ausgang y(k)

$$\frac{\mathcal{Z}\{y(k)\}}{\mathcal{Z}\{u(k)\}} = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_o + b_1 z^{-1} + \dots + b_{p_1} z^{-p}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{p_n} z^{-p_n}}$$
(7)

zu identifizieren, wird die Gleichung umgeschrieben

$$(1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_1} z^{-n_1}) y(z) = (b_o + b_1 z^{-1} + \dots + b_p z^{-p}) u(z)$$
 (8)

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - \dots - a_{n_1} y(k-n_1) + b_o u(k) + \dots + b_p u(k-p).$$
 (9)

Daraus leitet sich die Abb. 4 ab. Die Identifkation ist somit auf die Abb. 5a zurückgeführt.

6 Anwendung auf die Identifikation von Mehrgrößenregelstrecken

Bei Mehrgrößenstrecken lauten die entsprechenden Operationen für den r-ten Ausgang $y_r(k)$

$$\mathcal{Z}\{y_r(k)\} = y_r(z) = G_{r1}u_1(z) + G_{r2}u_2(z) + \dots + G_{rp}u_p(z) =$$

$$= \frac{z_{r1}u_1(z) + \dots}{n_r(z)}.$$
(10)

Darin sind $z_i(z)$ und $n_i(z)$ Polynome. Die zugehörige Gleichung für einen Ausgang $y_r(k)$ lautet dann

¹Der Index k des k-ten Teilschritts steht in keinem Zusammenhang mit dem Index k der laufenden Eingangsvariable x_{ek} in Gl.(1), Abb. 2, Abb. 5 usw.

$$y_{\tau}(k) = -[n_{\tau}(z) - 1]y_{\tau}(k - 1) + \dots + z_{\tau 1}u_{1}(k) + z_{\tau 2}u_{2}(k) . \tag{12}$$

Sie entspricht der Abb. 5b.

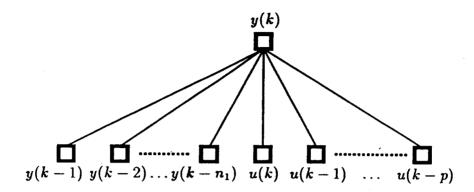


Abbildung 4: Neuronales Netz zur Regelstreckenidentifikation

7 Zusammenfassung

Je nach Anwendungsfall bieten in künstlichen neuronalen Netzen Methoden auf der Basis von Linearisierung, quadratischer Approximation und eingangsabhängiger Steigung die Möglichkeit zur analytischen Fassung von Lernalgorithmen. Bei Aufteilung der Approximationsfehler auf Ein- und Ausgänge sind Parallelen zu dem Verfahren der Total Least Squares gegeben. Dafür wird sowohl eine iterative, als auch eine rekursive Berechnungsvariante aufgezeigt.

APPENDIZES

A Zweischichtmodell

Von den n Eingängen x_{ek} , $k \in 1 ... n$, soll die statische Übertragung zu einem Ausgang x_a über ein neuronales Netz in der Form optimiert werden, daß M verschiedene Eingangsmuster x_{ekm} , $m \in 1 ... M$, den Ausgangssollwert y_m , $m \in 1 ... M$, bestmöglich approximieren

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - f_A(\sum_{k=1}^n w_k x_{ekm})]^2 \to \min_{w_k} .$$
 (13)

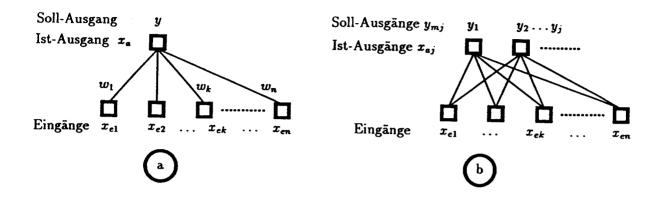


Abbildung 5: Zweischichtmodell mit Soll- und Istausgängen

Die Abb. 5a zeigt die Zusammenhänge für einen Ausgang und n Eingänge. Für besonders gelagerte Verhältnisse und ein dabei linear anzunehmendes $f_A(\cdot)$ und mit dem Vektor \mathbf{x}_{em} des m-ten Eingangswertes (des m-ten Eingangsprofils) $\mathbf{x}_{em} \triangleq \mathbf{vec}[x_{emk}]$ sowie $\mathbf{w} \triangleq \mathbf{vec}[w_k]$ folgt (unter der Annahme, daß die später verwendete Inverse existiert)

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}]^2 \to \min_{\mathbf{w}} . \tag{14}$$

Differenzierung nach w läßt

$$-\sum_{m=1}^{M} 2[y_m - \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}] \mathbf{x}_{em} = \mathbf{0} \qquad \Rightarrow \qquad \sum_{m=1}^{M} y_m \mathbf{x}_{em} = \sum_{m=1}^{M} \mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}$$
 (15)

folgern und das Resultat lautet

$$\mathbf{w} = \left(\sum_{m=1}^{M} \mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^{T}\right)^{-1} \left(\sum_{m=1}^{M} y_{m} \mathbf{x}_{em}\right) \qquad M > 1.$$
 (16)

Ein konstanter Term f_{Ao} bei der Linearisierung kann dadurch Aufnahme finden, daß die Summe $\sum_{k=1}^{n}$ auf eine mit $\sum_{k=0}^{n}$ ersetzt, der Vektor \mathbf{w} um $\mathbf{w}_{o} = f_{Ao}$ und der von \mathbf{x}_{em} um 1 ergänzt wird (*Chen, S., and Billings, S.A., 1992*).

Für p Ausgänge x_{aj} , $j \in 1 ...p$, folgt nach Abb. 5b

$$\sum_{m=1}^{M} [y_{mj} - \sum_{k=1}^{n} x_{ekm} w_{jk}]^2 \to \min_{w_{jk}} \quad \forall j \in 1 \dots p$$
 (17)

$$\sum_{m=1}^{M} [y_{mj} - \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}_j]^2 \to \min_{\mathbf{w}_{jk}} \quad \forall j \in 1 \dots p$$
 (18)

$$2\sum_{m=1}^{M}[y_{mj}-\mathbf{x}_{em}^{T}\mathbf{w}_{j}]\mathbf{x}_{em}=0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{m=1}^{M}y_{mj}\mathbf{x}_{em}=\sum_{m=1}^{M}\mathbf{x}_{em}\mathbf{x}_{em}^{T}\mathbf{w}_{j} \quad \forall j \in 1 \dots p \quad (19)$$

$$\mathbf{w}_{j} = \left(\sum_{m=1}^{M} \mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^{T}\right)^{-1} \left(\sum_{m=1}^{M} y_{mj} \mathbf{x}_{em}\right) \quad \forall j \in 1 \dots p.$$
 (20)

B Dreischichtmodell

Für das Dreischichtmodell mit zunächst einem Ausgang x_a laut Abb. 2 gilt

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - \sum_{j=1}^{n} w_{aj} s_{jm}]^2 \to \min_{w_{aj}}$$
 (21)

$$\mathbf{w}_a \stackrel{\triangle}{=} \operatorname{vec}_j[w_{aj}], \quad \mathbf{w}_j \stackrel{\triangle}{=} \operatorname{vec}_k[w_{jk}] \tag{22}$$

$$s_{jm} = \sum_{k=1}^{n} w_{jk} x_{emk} = \mathbf{w}_{j}^{T} \mathbf{x}_{em} \qquad \mathbf{s}_{m} \stackrel{\triangle}{=} \mathbf{vec}_{j}[s_{jm}]$$
 (23)

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - \mathbf{w}_a^T \mathbf{s}_m]^2 \to \min_{\mathbf{w}_a}$$
 (24)

$$\mathbf{W}_{H} \stackrel{\triangle}{=} (\mathbf{w}_{1} \vdots \dots \vdots \mathbf{w}_{j} \vdots \dots \vdots \mathbf{w}_{n}] \qquad \mathbf{s}_{m} = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_{1}^{T} \mathbf{x}_{em} \\ \mathbf{w}_{2}^{T} \mathbf{x}_{em} \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{n}^{T} \mathbf{x}_{em} \end{pmatrix} = \mathbf{W}_{H}^{T} \mathbf{x}_{em} \qquad (25)$$

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - \mathbf{w}_a^T \mathbf{W}_H^T \mathbf{x}_{em}]^2 \to \min_{\mathbf{w}_a, \mathbf{W}_H} . \tag{26}$$

Mit der Definition $\mathbf{W}_H \mathbf{w}_a \stackrel{\triangle}{=} \mathbf{w}$ folgt

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - \mathbf{w}^T \mathbf{x}_{em}]^2 \to \min_{\mathbf{w}} , \qquad (27)$$

sodaß dieselbe Herleitung angeschlossen werden kann wie an Gl. (14). Gleiches gilt auch für p Ausgänge und es ergibt sich, auf w angewendet, dasselbe Ergebnis wie Gl. (20). Der lineare Multilayer bringt also keinen weiteren Aufschluß wie das Zweischichtmodell.

C Zweischichtmodell mit nichtlinearem $f_A(\cdot)$

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - f_A(\sum_{l=1}^{n} x_{elm} w_l)]^2 \to \min_{w_l}$$
 (28)

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - f_A(\mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w})] f_A'(\mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}) \mathbf{x}_{em} = \mathbf{0} \quad \forall \ m = 1, 2...M$$
 (29)

C.1 $f_A(\cdot)$ quadratisch

$$f_A(\mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}) \stackrel{\triangle}{=} (\mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w})^2 \tag{30}$$

$$2\sum_{m=1}^{M} y_m(\mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}) \mathbf{x}_{em} = 2\sum_{m=1}^{M} (\mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w})^3 \mathbf{x}_{em}$$
(31)

$$\sum_{m=1}^{M} y_m(\mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}) = \sum_{m=1}^{M} \mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w} \mathbf{w}^T (\mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w})$$
(32)

$$\mathbf{x}_{em}\mathbf{x}_{em}^{T} \stackrel{\triangle}{=} \mathbf{D}_{em} , \quad \mathbf{w}\mathbf{w}^{T} \stackrel{\triangle}{=} \mathbf{W} \quad \rightsquigarrow \quad \sum_{m=1}^{M} y_{m} \mathbf{D}_{em}\mathbf{w} = \sum_{m=1}^{M} \mathbf{D}_{em} \mathbf{W} \mathbf{D}_{em}\mathbf{w}$$
 (33)

$$\sum_{m=1}^{M} (y_m \mathbf{I} - \mathbf{D}_{em} \mathbf{W}) \mathbf{D}_{em} \mathbf{w} = \mathbf{0}$$
(34)

$$\left(\sum_{m=1}^{M} y_m \mathbf{D}_{em} - \mathbf{D}_{em} \mathbf{W} \mathbf{D}_{em}\right) \mathbf{w} = \mathbf{0} \quad \text{und} \quad \det \left\{\sum_{m=1}^{M} (y_m \mathbf{I} - \mathbf{D}_{em} \mathbf{W}) \mathbf{D}_{em}\right\} = 0 . (35)$$

C.2 $f_A(\cdot)$ stückweise linear

Aus Gl.(29) folgt für stückweise lineare $f_A(\cdot)$ laut Abb. 6 ein sehr einfaches $f'_A(\cdot)$ mit den Werten 0 und 1. Für ein zweidimensionales w sind es zwei Gleichungen in w_1 und w_2 , jede davon entspricht einer Kurve in der w_1 - w_2 -Ebene. Der Schnittpunkt beider ist das gesuchte w^* . Diese beiden Gleichungen lauten

$$[y_1 - f_A(x_{e11}w_1 - x_{e21}w_2)]f'_A(x_{e11}w_1 - x_{e21}w_2)x_{e11} + [y_2 - f_A(x_{e12}w_1 - x_{e22}w_2)]f'_A(x_{e12}w_1 - x_{e22}w_2)x_{e12} = 0$$

$$(36)$$

$$[y_1 - f_A(x_{e11}w_1 - x_{e21}w_2)]f'_A(x_{e11}w_1 - x_{e21}w_2)x_{e21} + [y_2 - f_A(x_{e12}w_1 - x_{e22}w_2)]f'_A(x_{e12}w_1 - x_{e22}w_2)x_{e22} = 0$$

$$(37)$$

Für dreidimensionales w besteht das Resultat aus den gemeinsamen Punkten aus drei Flächen usw.

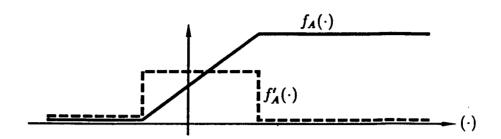


Abbildung 6: Stückweise lineare Aktivierungsfunktion

C.3 Eingangsabhängige Steigung

Für bestimmte Eingangsmuster ist der Ausdruck $w_k x_{ekm}$ über m stark verschieden, sodaß er auf der Aktivierungsfunktion $f_A(\cdot)$ auf Punkte mit stark unterschiedlicher Steigung trifft. Die Konstanz der Steigung, so wie sie in Appendix A ausgeführt wurde, wäre dann zur Modellbildung nicht geeignet. Unter der Annahme, daß je Eingangsmuster m ein Identifizierungscode angereiht werden kann, läßt sich die Steigung von $f_A(\cdot)$ je Eingangsmuster m als α_m unbekannt ansetzen und in das Lernen einbeziehen. Dann folgt

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - \alpha_m \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}]^2 \rightarrow \min_{\mathbf{w}, \alpha_r} \quad \forall \ r = 1, 2, ..., M \ . \tag{38}$$

Aus der Differenzierung nach α_r ergibt sich

$$\alpha_r = \frac{y_r}{\mathbf{x}_{-}^T \mathbf{w}} \quad \forall \ r = 1, 2....M , \qquad (39)$$

aus der Differzierung nach w

$$\sum_{m=1}^{M} \alpha_m y_m \mathbf{x}_{em} = \sum_{m=1}^{M} \alpha_m^2 \mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w} . \tag{40}$$

Zusammengezogen folgt

$$\sum_{m=1}^{M} \frac{y_m^2}{\mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}} \mathbf{x}_{em} = \sum_{m=1}^{M} \frac{y_m^2}{(\mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w})^2} \mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}$$
(41)

als eine Vektorgleichung für den n-Vektor w. Diese Gleichung ist nicht angenehm, aber immer noch besser beherrschbar als das Ergebnis

$$\sum_{m=1}^{M} \left[y_m - \frac{1}{1 + e^{-\sum_{k=1}^{n} w_k x_{ekm}}} \right] \frac{e^{-\sum_{k=1}^{n} w_k x_{ekm}}}{(1 + e^{-\sum_{k=1}^{n} w_k x_{ekm}})^2} x_{ekm} = 0 \quad \forall \ k = 1, 2 n , \tag{42}$$

jene n Gleichungen in w_k , die für die spezielle Aktivierungsfunktion $f_A(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$ und für $z = \sum_{k=1}^n w_k x_{ekm}$ bei analytischer Untersuchung erhalten werden (Chen, S., and Billings, S.A., 1992).

D Fehleraufteilung auf Ausgang und Eingänge

Die nunmehr vorliegende Situation betrifft bei linearem $f_A(\cdot)$ einen Ausgang und n Eingänge z_{em} als Vektor \mathbf{z}_{em} ; die Größe \mathbf{x}_{em} fungiert nur als Zwischenträger, um Eingangsfehler unterbringen zu können

$$\sum_{m=1}^{M} [y_m - \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}]^2 + \beta (\mathbf{x}_{em} - \mathbf{z}_{em})^T (\mathbf{x}_{em} - \mathbf{z}_{em}) \to \min_{\mathbf{w}, \mathbf{x}_{em}}$$
(43)

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{w}}: \qquad \sum_{m=1}^{M} [y_m - \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w}](-2\mathbf{x}_{em}) = 0$$
 (44)

$$\sum_{m=1}^{M} y_m \mathbf{x}_{em} = (\sum_{m=1}^{M} \mathbf{x}_{em} \mathbf{x}_{em}^T) \mathbf{w}$$
 (45)

 $Mit y \triangleq \mathbf{vec}[y_i] \text{ folgt}$

$$\mathbf{X}_{e}\mathbf{y} = \mathbf{X}_{e}\mathbf{X}_{e}^{T}\mathbf{w} \qquad \mathbf{X}_{e} \stackrel{\triangle}{=} (\mathbf{x}_{e1} : \mathbf{x}_{e2} : \dots : \mathbf{x}_{em} \dots : \mathbf{x}_{eM}). \tag{46}$$

Wenn \mathbf{x}_{em} statt \mathbf{z}_{em} die Eingangsgröße wäre, dann läge damit das Resultat aus Gl. (16) vor. Doch de facto ist \mathbf{x}_{em} nur Zwischenträger und es folgt weiters nach $\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_{em}}$

$$-2(y_m - \mathbf{x}_{em}^T \mathbf{w})\mathbf{w} + 2\beta(\mathbf{x}_{em} - \mathbf{z}_{em}) = \mathbf{0} \qquad \forall m = 1 \dots M$$
 (47)

$$-y_m \mathbf{w} + \mathbf{w} \mathbf{w}^T \mathbf{x}_{em} + \beta \mathbf{x}_{em} - \beta \mathbf{z}_{em} = \mathbf{0} \qquad \forall m = 1 \dots M$$
 (48)

$$\mathbf{x}_{em} = (\beta \mathbf{I} + \mathbf{w}\mathbf{w}^T)^{-1} (y_m \mathbf{w} + \beta \mathbf{z}_{em}) \qquad \forall m \in 1 \dots M$$
 (49)

Die Gl. (46) und (49) sind gemeinsam zu lösen. Die Konvergenz des Algorithmus wird an einem Beispiel in der Abb. 3 gezeigt.

E Rekursive Formulierung

Die Zerlegung des Ergebnisses nach k-1 Schritten und bei Hinzunahme des k-ten Vektors ergibt

$$\mathbf{X}_{ek}\mathbf{X}_{ek}^{T} = (\mathbf{x}_{e1} \ \vdots \ \mathbf{x}_{e2} \ \vdots \ \dots \ \vdots \ \mathbf{x}_{e,k-1} \ \vdots \ \mathbf{x}_{ek}) \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{e1}^{T} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{e,k-1}^{T} \\ \mathbf{x}_{ek}^{T} \end{pmatrix} = \mathbf{X}_{e,k-1}\mathbf{X}_{e,k-1}^{T} + \mathbf{x}_{ek}\mathbf{x}_{ek}^{T} . \tag{50}$$

Wird M durch k ersetzt, dann gilt

$$\sum_{m=1}^{k} y_m \mathbf{x}_{em} = \mathbf{X}_{e} \mathbf{y} = (\mathbf{X}_{e,k-1} : \mathbf{x}_{ek}) {\mathbf{y}_{k-1} \choose y_k} = \mathbf{X}_{e,k-1} \mathbf{y}_{k-1} + y_k \mathbf{x}_{ek}$$
 (51)

$$\mathbf{w}_k = (\mathbf{X}_{ek} \mathbf{X}_{ek}^T)^{-1} \mathbf{X}_{ek} \mathbf{y}_k . \tag{52}$$

Das Matrizeninversionslemma angewendet ergibt

$$\mathbf{w}_{k} = \{ (\mathbf{X}_{e,k-1} \mathbf{X}_{e,k-1}^{T})^{-1} - (\mathbf{X}_{e,k-1} \mathbf{X}_{e,k-1})^{-1} \mathbf{x}_{ek} [1 + \mathbf{x}_{ek}^{T} (\mathbf{X}_{e,k-1} \mathbf{X}_{e,k-1})^{-1} \mathbf{x}_{ek}]^{-1} \mathbf{x}_{ek}^{T} (\mathbf{X}_{e,k-1} \mathbf{X}_{e,k-1})^{-1} \} \times \\ \times [\mathbf{X}_{e,k-1} \mathbf{y}_{k-1} + y_{k} \mathbf{x}_{ek}]$$
(53)

Mit

$$\mathbf{P}_{k-1} \stackrel{\triangle}{=} (\mathbf{X}_{e,k-1} \mathbf{X}_{e,k-1}^T)^{-1} \tag{54}$$

(52).....
$$\mathbf{X}_{e,k-1}\mathbf{y}_{k-1} = \mathbf{P}_{k-1}^{-1}\mathbf{w}_{k-1}$$
 (55)

$$\mathbf{w}_{k} = \{\mathbf{P}_{k-1} - \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek} [1 + \mathbf{x}_{ek}^{T} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek}]^{-1} \mathbf{x}_{ek}^{T} \mathbf{P}_{k-1} \} [\mathbf{P}_{k-1}^{-1} \mathbf{w}_{k-1} + y_{k} \mathbf{x}_{ek}]$$
(56)

$$\mathbf{w}_{k} = \{\mathbf{I} - \mathbf{P}_{k-1} \frac{\mathbf{x}_{ek} \mathbf{x}_{ek}^{T}}{1 + \mathbf{x}_{ek}^{T} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek}}\} [\mathbf{w}_{k-1} + y_{k} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek}] .$$
 (57)

Nach dem Matrizeninversionslemma $(A + BC)^{-1}$ mit $A := \beta I$, $B := \mathbf{w}$, $C := \mathbf{w}^T$ ergibt sich aus Gl. (49)

$$(\mathbf{w}\mathbf{w}^T + \beta \mathbf{I})^{-1} = \frac{1}{\beta}\mathbf{I} - \frac{1}{\beta}\mathbf{I}\mathbf{w}(1 + \mathbf{w}^T \frac{1}{\beta}\mathbf{I}\mathbf{w})^{-1}\mathbf{w}^T \frac{1}{\beta}\mathbf{I} = \frac{1}{\beta}[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{w}\mathbf{w}^T}{\beta + \mathbf{w}^T\mathbf{w}}]$$
(58)

$$\mathbf{x}_{ek} = \left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T}{\beta + \mathbf{w}_k^T \mathbf{w}_k}\right] \left[\mathbf{z}_{ek} + \frac{y_k}{\beta} \mathbf{w}_k\right] \quad \forall k \in 1 \dots M$$
 (59)

Je Schritt k ist mehrfach zwischen Gl. (57) und (59) einzusetzen.

Nach Abschluß der konvergenten Prozedur beim k-ten Schritt findet man für die Rekursion von \mathbf{P}_{k-1} auf \mathbf{P}_k

$$\mathbf{P}_{k} = [(\mathbf{X}_{e,k-1} : \mathbf{x}_{ek})(\mathbf{X}_{e,k-1} : \mathbf{x}_{ek})^{T}]^{-1}$$
(60)

$$= [(\mathbf{X}_{e,k-1} : \mathbf{x}_{ek}) {\mathbf{X}_{e,k-1}^T \choose \mathbf{X}_{e,k}^T}]^{-1} = [\mathbf{X}_{e,k-1} \mathbf{X}_{e,k-1}^T + \mathbf{x}_{ek} \mathbf{x}_{ek}^T]^{-1}$$
(61)

$$= \mathbf{P}_{k-1} - \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek} (1 + \mathbf{x}_{ek}^T \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek})^{-1} \mathbf{x}_{ek}^T \mathbf{P}_{k-1}$$
(62)

$$\mathbf{P}_{k} = \mathbf{P}_{k-1} [\mathbf{I} - \frac{\mathbf{x}_{ek} \mathbf{x}_{ek}^{T}}{1 + \mathbf{x}_{ek}^{T} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek}} \mathbf{P}_{k-1}] . \tag{63}$$

F Gewichtete rekursive Formulierung

Mit Gewichtung in der Form $\mathbf{X}_{ek}\mathbf{X}_{ek}^T = (1-\alpha)\mathbf{X}_{e,k-1}\mathbf{X}_{e,k-1}^T + \alpha\mathbf{x}_{ek}\mathbf{x}_{ek}^T$ resultiert (für $\alpha \neq 1$)

$$\mathbf{w}_{k} = \{\mathbf{I} - \mathbf{P}_{k-1} \frac{\mathbf{x}_{ek} \mathbf{x}_{ek}^{T} \alpha^{2}}{(1-\alpha)^{2} + \mathbf{x}_{ek}^{T} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek} \alpha^{2}} \} [\mathbf{w}_{k-1} + \frac{\alpha}{(1-\alpha)^{2}} y_{k} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek}]$$
(64)

$$\mathbf{P}_{k} = \mathbf{P}_{k-1} \left[\frac{1}{(1-\alpha)^{2}} \mathbf{I} - \frac{\mathbf{x}_{ek} \mathbf{x}_{ek}^{T}}{(1-\frac{1}{\alpha})^{2} + \mathbf{x}_{ek}^{T} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_{ek}} \mathbf{P}_{k-1} \right].$$
 (65)

Gl. (49) gilt unverändert.

Tabelle 1: Vergleiche verschiedener quadratischer Minimierungsaufgaben

Ordinary Least Squares	$\left. e^T \epsilon \right _{\mathbf{Mp} + \epsilon = \mathbf{y}} \to \min_{\mathbf{p}}$
Total Least Squares	$\left \epsilon^T \epsilon + \beta \operatorname{tr} \{ \mathbf{E}^T \mathbf{E} \} \right _{(\mathbf{M} + \mathbf{E})\mathbf{p} + \epsilon = \mathbf{y}} \to \min_{\mathbf{p}, \mathbf{E}}$

G Vergleich mit Ordinary and Total Least Squares

Die Minimierung des künstlichen neuronalen Netzes kann mit $\mathbf{p} := \mathbf{w}$ und $\mathbf{M} := \mathbf{X}_{e}^{T}$ und bei Definition des Matrix \mathbf{Z} durch col $\mathbf{Z} = \operatorname{col}_{k} \mathbf{z}_{ek}$ wie folgt umgeschrieben werden

$$(\mathbf{y} - \mathbf{X}_{\epsilon}^{T} \mathbf{w})^{T} (\mathbf{y} - \mathbf{X}_{\epsilon}^{T} \mathbf{w}) + \beta \operatorname{tr}(\mathbf{X}_{\epsilon}^{T} - \mathbf{Z})^{T} (\mathbf{X}_{\epsilon}^{T} - \mathbf{Z}) \rightarrow \min_{\mathbf{w}, \mathbf{X}_{\epsilon}}$$
(66)

$$(\mathbf{y} - \mathbf{M}\mathbf{p})^T(\mathbf{y} - \mathbf{M}\mathbf{p}) + \beta \operatorname{tr}\{(\mathbf{M}^T - \mathbf{Z})^T(\mathbf{M}^T - \mathbf{Z})\} \rightarrow \min_{\mathbf{w}, \mathbf{M}}.$$
 (67)

Dabei bedeutet col den Operator, der aus den Spalten einer Matrix einen resultierenden Vektor entsprechender Dimension herstellt, und tr die Spur einer Matrix. Mit $\mathbf{M} - \mathbf{Z} \stackrel{\triangle}{=} \mathbf{E}$ und $\boldsymbol{\varepsilon} \stackrel{\triangle}{=} \mathbf{y} - \mathbf{Mp}$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} + \beta \operatorname{tr} \{ (\mathbf{M}^T - \mathbf{Z})^T (\mathbf{M}^T - \mathbf{Z}) \} \rightarrow \min_{\mathbf{w}, \mathbf{M}}$$
 (68)

$$\epsilon^T \epsilon + \beta \operatorname{tr} \{ \mathbf{E}^T \mathbf{E}^T \} \Big|_{(\mathbf{Z} + \mathbf{E})\mathbf{p} + \epsilon = \mathbf{y}} \to \min_{\mathbf{p}, \mathbf{E}}$$
 (69)

ist die Aufgabe dem Problem der Total Least Squares praktisch identisch. In der Tabelle 1 ist eine Gegenüberstellung zu den bekannten Methoden präsentiert.

Literatur

Chen, S., and Billings, S.A., 1992, Neural networks for nonlinear dynamic system modelling and identification, Int. J. Control 56, pp. 319-346

Untersuchungen zur Konstruktion von Leichtbaurobotern

I. Çaushi', K. Desoyer' und P. Kopacek'
Institut für Handhabungsgeräte und Robotertechnik
Institut für Mechanik
Technische Universität Wien
Wien, Österreich

Eingelangt: 14. Juli 1993

<u>Kurzfassung:</u> In dieser Arbeit werden Möglichkeiten gesucht, die Massen der auf Biegung beanspruchten Armglieder eines Roboters durch geometrisch geeignete Formgebung und Verwendung von Leichtbauwerkstoffen zu minimieren. Geometrische Parameter sowie Materialkennwerte werden einer Analyse unterzogen und deren Auswirkungen auf die Masse bei geforderter Steifigkeit diskutiert.

1. Einleitung

Industrieroboter und Handhabungsgeräte haben sich bereits einen festen Platz in der Produktion gesichert. Galt der Industrieroboter (IR) vor fünf bis acht Jahren als innovatives autonomes Hightech-Gerät, beginnt er jetzt seinen ihm zustehenden Platz in der modernen rechnerintegrierten Fertigung (CIM) einzunehmen.

Bei den derzeit im Einsatz befindlichen Industrierobotern, abgesehen von einigen Sonderkonstruktionen, reicht das Verhältnis Nutzlast zu Eigengewicht etwa von 1:10 bis 1:75 (Desoyer et al., 1985). Vergleicht man dieses mit dem eines kräftigen Menschen, der Lasten in der Größenordnung seines Eigengewichtes tragen kann, müssen diese Werte noch als sehr klein angesehen werden. Bei der dazu aufschlußreicheren Betrachtung des Verhältnisses der maximalen kinetischen Energie der Nutzlast zu der der sonstigen bewegten Teile zeigt sich bei den derzeitigen Robotern mit sechs oder weniger Freiheitsgraden - bei denen also i.a. alle Glieder bewegt werden müssen - daß bei Bewegungen, die einen wesentlichen Teil des Arbeitsbereiches durchmessen, dieses Verhältnis der kinetischen Energien ebenfalls äußerst ungünstig ist.

Besonders bei dem in den letzten Jahren verstärkten Einsatz künstlicher Intelligenz in der Robotik ist ein möglichst großes Verhältnis der Nutzlast zum Eigengewicht erstrebenswert. Die Bewegungsabläufe werden hier nicht mehr starr programmiert, sondern den anfallenden Arbeitsgängen, bewegten Hindernissen, geforderten Genauigkeiten oder dergleichen angepaßt, wodurch große Beschleunigungen beziehungsweise Verzögerungen erfolgen müssen, die bei geringer Masse entsprechend leichter zu realisieren sind. Als Schlußfolgerung stellt sich die Forderung nach der Verringerung der Massen der Robo-

ter. Prinzipiell entspricht diese Forderung einer Optimierung der Masse. Jedoch kann eine Optimierung auch andere Ziele verfolgen, wie etwa die Minimierung der Masse der Glieder, der kinetischen Energie (Çaushi, 1991) oder des Verschleißes; aber auch wirtschaftliche Kriterien können ausschlaggebend sein, wie beispielsweise Material- und Herstellungskosten oder der Energiebedarf (Çaushi, 1993) einer vorgegebenen Bewegung.

Weltweit werden intensiv Maßnahmen untersucht, um eine Reduktion des Verhältnisses von Robotermasse zu Masse der Nutzlast zu erreichen (Çaushi, 1993), (Desoyer und Kopacek, 1992). Man kann hierbei zwei wesentliche Ansätze unterscheiden: Einmal die Verwendung von Leichtbauweisen, die zu sogenannten flexiblen Robotern führen, zum anderen die Verwendung neuer Bauformen (Walser, 1991) und Materialien (Urbanek, 1988), mit dem Ziel, bei leichterer Bauweise gleichzeitig die mit flexiblen Robotern verbundenen Probleme der Regelung möglichst zu vermeiden.

Die Steifigkeit der Konstruktion sollte bei einer Gewichtsreduktion erhalten bleiben, da bei zu elastischen und flexiblen Robotergliedern der Kontrollrechner wegen der auftretenden Schwingungen und Deformationen und dem damit verbundenen hohen Regelaufwand überlastet wird. Versuche, das Schwingungsverhalten der Roboterarme über die Methode der Finiten Elemente oder mittels Ansatzfunktionen zur Unterstützung des Kontrollrechners und der damit verbundenen genaueren Steuerung zu berechnen, ergaben einen extremen Rechenaufwand, der in Echtzeit nicht bewältigt werden konnte. Die Forderung nach einer Gewichtsverringerung muß daher stets in Verbindung mit einer ausreichenden Steifigkeit gesehen werden. Um die Deformationen in für den Rechner bewältigbaren Grenzen zu halten und das Gewicht des Roboters zu verringern, wird man neue Konstruktionsprinzipien sowie neuartige Werkstoffe oder bekannte, die aber neuen Herstellungsmethoden unterzogen worden sind, verwenden müssen.

In dieser Arbeit werden zuerst Möglichkeiten gesucht, die Massen der auf Biegung beanspruchten Armglieder eines Roboters durch konstruktive Maßnahmen und geometrisch geeignete Formgebung zu minimieren.

Anhand eines Robotermodells wird auf die Einflußgrößen für die Masse und Durchbiegung eingegangen. Geometrische Parameter, wie etwa Wandstärke oder Querschnittsabmessungen, aber auch Materialkennwerte werden einer Analyse unterzogen und deren Auswirkungen auf die Masse bei geforderter Steifigkeit diskutiert.

Anschließend werden die Auswirkungen der Querschnittsform sowie einer Querschnittsabnahme längs des Roboterarmes auf die oben gestellte Forderung untersucht. Für spezielle Querschnittsformen (Ellipsen- und Rechteck-Hohlprofil) und einer variablen Querschnittsverjüngung werden mit Hilfe numerischer Integrationen in Diagrammen die Verformungen über den Höhe/Breite -Verhältnissen, Verjüngungsfaktoren etc. aufgetragen. Aus den dadurch erhaltenen Kurven und Tabellen können Aussagen über die Eignung von Profilformen und Leichtbaumaterialien für den Bau von Leichtrobotern getroffen werden.

2. Das Modell

Der Arm eines Roboters kann in guter Näherung als einseitig eigespannter Träger betrachtet werden, der um einen inertialfesten Drehpunkt in der Einspannstelle drehbeschleunigt wird (Walser, 1991). Die Bezeichnung der Glieder eines Roboters erfolgt vom Fundament mit 0 ausgehend mit steigenden Nummern. Die Einspannstelle des Trägers stellt die Verbindung zum Glied mit der nächst niedrigeren Nummer dar. Betrachtet man den Fall, daß der Greifer eines Roboters auf einen festen Gegenstand hinbewegt und abgebremst werden muß, so wird der Roboterarm durch sein Eigengewicht und durch Massenkräfte belastet, sowie durch Gelenkskräfte am äußeren Ende des Trägers, die von weiteren Gliedern, Greifersystem und Werkstück herrühren. Deshalb soll das Modell dynamischer Natur sein. Für die folgenden Untersuchungen wird vorausgesetzt, daß die mit der Masse m₂ zusammengefaßten "weiteren Glieder" keine Relativbewegung bezüglich des betrachteten Hauptgliedes ausführen.

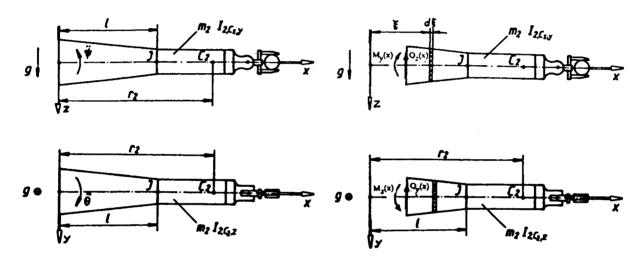


Abb. 1 Das mechanische Modell des Roboterarmes

Der für die Berechnung der vertikalen Durchbiegung benötigte Biegemomentenverlauf $M_y(x)$ (Abb. 1) errechnet sich aus dem Schwerpunktsatz

$$[\int_{x}^{1} \rho A(\xi) \xi d\xi + m_{2} r_{2}] \tilde{\Psi} = Q_{z}(x) - \int_{x}^{1} \rho g A(\xi) d\xi - m_{2} g$$
(1)

und dem Drallsatz

$$I_{y}\Psi = -M_{y}(x) + xQ_{z}(x) - \int_{x}^{l} \rho g A(\xi) \xi d\xi - r_{2} m_{2} g$$
 (2)

mit dem Trägheitsmoment

$$I_{y} = \int_{x}^{l} \rho A(\xi) \xi^{2} d\xi + \int_{x}^{l} \rho J_{y}(\xi) d\xi + I_{2,C_{2},y} + m_{2}r_{2}^{2}$$
(3)

wobei im Term

$$\int_{z}^{t} \rho J_{y}(\xi) d\xi \tag{4}$$

 $J_y(\xi)$ das geometrische Trägheitsmoment des betreffenden Querschnittes bedeutet. Dieser Term wird näherungsweise öfters vernachlässigt (z.B. Walser, 1991). Hier wird vollständigkeitshalber dieser Einfluß mitberücksichtigt, obwohl dadurch bei der Integration lange Ausdrücke entstehen, die entsprechend rechenaufwendig sind. Der Einfluß wird dann quantitativ beurteilt. Mit (3) folgt aus (1) und (2) durch Elimination der Querkraft $Q_z(x)$ der Verlauf des Biegemomentes $M_v(x)$:

$$M_{y}(x) = -\left[\int_{x}^{l} \rho A(\xi)(\xi - x)\xi d\xi + \int_{x}^{l} \rho J_{y}(\xi)d\xi + I_{2,C_{2},y} + m_{2}r_{2}(r_{2} - x)\right]\Psi$$

$$-\int_{x}^{l} \rho g A(\xi)(\xi - x)d\xi - (r_{2} - x)m_{2}g$$
(5)

Für die Drehung um die vertikale Achse ergibt sich analog:

$$M_{z}(x) = -\left[\int_{x}^{l} \rho A(\xi)(\xi - x)\xi d\xi + \int_{x}^{l} \rho J_{z}(\xi)d\xi + I_{2,C_{2},z} + m_{2}r_{2}(r_{2} - x)\right]\ddot{\theta}$$
 (6)

In den obigen Gleichungen bedeuten:

g Fallbeschleunigung

ψ, θ Winkelbeschleunigungen um horizontale bzw. vertikale Drehachse

m₂ Masse weiterer Roboterglieder, Greifer und Nutzlast

I_{2,C2,y}, I_{2,C2,z} Massenträgheitsmomente weiterer Glieder, Greifer und Nutzlast r₂ Abstand des Gesamtschwerpunktes C₂ weiterer Glieder vom Drehpol

Länge des betrachteten Robotergliedes

Bei üblichen Roboterkonstruktionen werden Hohlprofile verwendet, da diese bei gleicher Masse biegesteifer als Vollprofile sind (Walser, 1988).

Von der Vielzahl denkbarer Profilformen werden hier zwei Querschnittsformen genauer betrachtet: der Ellipsen- und der Rechteck-Hohlquerschnitt. Ausgehend von den zwei Grundformen - Kreis- bzw. quadratischer Hohlquerschnitt - kommt man zu diesen speziellen Querschnittsformen aus der Überlegung, daß die Abmessungen in vertikaler Richtung wegen der zusätzlichen Schwerkräfte bzw. -momente, größer als die in horizontaler Richtung sein sollen. Beide Grundformen können dann mit den allgemein erstellten Simulationsprogrammen als spezielle Fälle für gleiche vertikale und horizontale Abmessungen betrachtet werden.

Einen längs der Trägerachse abnehmenden Querschnitt - stetig oder auch unstetig - wird man als sinnvoll erachten - wie bei einem eingespannten Träger gleicher Festigkeit mit Endlast. Zusätzlich kommt noch die Tatsache hinzu, daß bei einer beschleunigten Drehung Punkte mit einem größeren Abstand vom Drehpunkt einer höheren Beschleunigung ausgesetzt sind und sich daher in diesem Abstand eine kleinere Masse durch

Querschnittsverjüngung günstig auswirkt. Dem steht jedoch das verringerte Flächenträgheitsmoment gegenüber. Theoretisch sind auch bei der Querschnittsabnahme eine Vielzahl von Varianten möglich, wovon einige aber fertigungstechnische Probleme bereiten können, wie z.B. der von Walser (Walser, 1991) betrachtete Fall linearer Querschnittsverjüngungen, der zu kompliziertem Verlauf der Abmessungen führt. Hier wird der fertigungstechnisch günstige Fall linearer Abnahme der Abmessungen mit gleichen Verjüngungsfaktoren in vertikaler und horizontaler Richtung $(k_V = k_H = k)$ behandelt, der allerdings eine aufwendigere Integration der Gleichungen verursacht.

Anschließend wird für die oben erwähnten Querschnitte aus dem Biegemomentenverlauf die Durchbiegung berechnet und für verschiedene Abmessungen, Belastungsfälle usw. als Funktion des Höhe/Breite-Verhältnisses, Verjüngungsfaktors etc. in Diagrammen dargestellt.

Ellipsen-Hohlquerschnitt: Es wird eine lineare Abnahme der äußeren Querschnittsabmessungen über die Länge 1 betrachtet:

$$a = A(1-k \xi/l)$$
 und $b = B(1-k \xi/l)$ (7)

wobei mit den Großbuchstaben A und B die große bzw. kleine Halbachse an der Einspannstelle $\xi = 0$ bezeichnet sind. Dadurch können verschiedene Querschnittsabnahmen durch Variation des "Verjüngungsfaktors" k dargestellt werden. So ergibt k=0 einen über die Trägerlänge konstanten Querschnitt, k=0.5 bedeutet eine Abnahme auf die halben Querschnittsabmessungen. Die Wandstärke s sei konstant.

Der maximale Verjüngungsfaktor ergibt sich aus:

$$b_{(x=1)} = s \text{ bzw. } s = B(1-k_{max}): \quad 0 \le k \le 1-s/B$$
 (8)

Da bei verjüngten Teilen des Roboterarmes die Voraussetzung für dünnwandige Querschnitte nicht immer erfüllt ist, werden hier keine Näherungsformeln für die Trägheitsmomente verwendet, sondern die genauen Beziehungen, die allerdings zu einer aufwendigeren Integration führen.

Für die Flächenträgheitsmomente $J_y^E(\xi)$ und $J_z^E(\xi)$, die Fläche $A^E(\xi)$ und die Masse m^E gelten folgende Beziehungen: $J_{v}^{E} = \pi/4 \left[a^{3}b - (a-s)^{3}(b-s)\right]$ $J_{z} = \pi/4 \left[ab^{3} - (a-s)(b-s)^{3}\right]$

$$J_{v}^{E} = \pi/4 \left[a^{3}b - (a-s)^{3}(b-s) \right] \qquad J_{z} = \pi/4 \left[ab^{3} - (a-s)(b-s)^{3} \right]$$
 (9)

Gleichung (7) in (9) eingesetzt ergibt:

$$J_{y}^{E}(\xi) = \frac{\pi}{4} s[A^{2}(A+3B)(1-\frac{k}{l}\xi)^{3} - 3sA(A+B)(1-\frac{k}{l}\xi)^{2} + s^{2}(3A+B)(1-\frac{k}{l}\xi) - s^{3}]$$
 (10)

$$J_{z}^{E}(\xi) = \frac{\pi}{4} s[B^{2}(B+3A)(1-\frac{k}{l}\xi)^{3} - 3sB(B+A)(1-\frac{k}{l}\xi)^{2} + s^{2}(3B+A)(1-\frac{k}{l}\xi) - s^{3}]$$
 (11)

Querschnittsfläche:

$$A^{E}(\xi) = \pi [ab - (a-s)(b-s)] = \pi s(a+b-s) = \pi s[(A+B)(1-\frac{k}{l}\xi)-s]$$
 (12)

Masse:

$$m^{E} = \int_{V} \rho dV = \rho \int_{0}^{l} A^{E}(\xi) d\xi = \rho \pi s \int_{0}^{l} [(A+B)(1-\frac{k}{l}\xi)-s] d\xi = \rho \pi s l[(A+B)(1-\frac{k}{2})-s]$$
(13)

Biegemomente:

$$M_{y}^{E} = -\Psi[\rho \pi s \int_{x}^{l} [(A+B)(1-k\frac{\xi}{l})-s](\xi-x)\xi d\xi + I_{2,C_{2}y} + m_{2}r_{2}(r_{2}-x)$$

$$+\rho \frac{\pi}{4} \int_{x}^{l} [sA^{2}(A+3B)(1-\frac{k}{l}\xi)^{3}-3s^{2}A(A+B)(1-\frac{k}{l}\xi)^{2}+s^{3}(3A+B)(1-\frac{k}{l}\xi)-s^{4}]d\xi]$$

$$-\pi g \rho s \int_{x}^{l} [(A+B)(1-\frac{k}{l}\xi)-s](\xi-x)d\xi - m_{2}g(r_{2}-x)$$

$$(14)$$

$$M_{z}^{E} = -\ddot{\theta} \left[\rho \pi s \int_{x}^{l} [(B+A)(1-k\frac{\xi}{l})-s](\xi-x)\xi d\xi + I_{2,C_{2}z} + m_{2}r_{2}(r_{2}-x) \right]$$

$$+ \rho \frac{\pi}{4} \int_{x}^{l} [sB^{2}(B+3A)(1-\frac{k}{l}\xi)^{3} - 3s^{2}B(B+A)(1-\frac{k}{l}\xi)^{2} + s^{3}(3B+A)(1-\frac{k}{l}\xi) - s^{4}]d\xi$$

$$(15)$$

Die Integration von (14) und (15) ergibt:

$$M_{y}^{E}(x) = -\Psi[\pi \rho s[-(A+B)\frac{k}{12l}x^{4} + \frac{1}{6}(A+B-s)x^{3} + l^{2}[(A+B)(\frac{k}{3} - \frac{1}{2}) + \frac{s}{2}]x + l^{3}[(A+B)(\frac{1}{3} - \frac{k}{4}) - \frac{s}{3}]]$$

$$+ I_{2,C_{2}y} + m_{2}r_{2}(r_{2} - x) + \frac{\pi \rho}{4} \left[\frac{sA^{2}}{4}(A+3B)[(\frac{k}{l})^{3}x^{4} + 4(\frac{k}{l})^{2}x^{3} + 2(\frac{k}{l})x^{2} - 4x - lk^{3} - 4lk^{2} - 2lk + 4l]\right]$$

$$-s^{2}A(A+B)[-(\frac{k}{l})^{2}x^{3} + 3(\frac{k}{l})x^{2} - 3x + lk^{2} - 3lk + 3l] + \frac{s^{3}}{2}(3A+B)(\frac{k}{l}x - 2x - lk + 2l) + s^{4}(x-l)]]$$

$$-\pi g\rho s[-(A+B)\frac{k}{6l}x^{3} + \frac{1}{2}(A+B-s)x^{2} + l[(A+B)(\frac{k}{2} - 1) + s]x + l^{2}[(A+B)(\frac{1}{2} - \frac{k}{3}) - \frac{s}{2}]] - m_{2}g(r_{2} - x)$$

$$(16)$$

$$M_{z}^{E}(x) = -\tilde{\theta} \left[\pi \rho s \left[-(B+A)\frac{k}{12l}x^{4} + \frac{1}{6}(B+A-s)x^{3} + l^{2}\left[(B+A)(\frac{k}{3} - \frac{1}{2}) + \frac{s}{2}\right]x + l^{3}\left[(B+A)(\frac{1}{3} - \frac{k}{4}) - \frac{s}{3}\right]\right] + l_{2,C_{2}x} + m_{2}r_{2}(r_{2} - x) + \frac{\pi \rho}{4}\left[\frac{sB^{2}}{4}(B+3A)\left[(\frac{k}{l})^{3}x^{4} + 4(\frac{k}{l})^{2}x^{3} + 2(\frac{k}{l})x^{2} - 4x - lk^{3} - 4lk^{2} - 2lk + 4l\right] - s^{2}B(B+A)\left[-(\frac{k}{l})^{2}x^{3} + 3(\frac{k}{l})x^{2} - 3x + lk^{2} - 3lk + 3l\right] + \frac{s^{3}}{2}(3B+A)(\frac{k}{l}x - 2x - lk + 2l) + s^{4}(x - l)\right]\right]$$

$$(17)$$

Rechteck-Hohlquerschnitt: Für die Flächenträgheitsmomente gilt

$$J_{y}^{R} = \frac{bh^{3}}{12} - \frac{(b-2s)(h-2s)^{3}}{12} \qquad J_{z}^{R} = \frac{b^{3}h}{12} - \frac{(b-2s)^{3}(h-2s)}{12}$$
 (18)

mit

$$b = B(1-k_H \xi/l)$$
 und $h = H(1-k_V \xi/l)$ (19)

Aus
$$k_V = k_H = k$$
 folgt $\frac{b(\xi)}{h(\xi)} = \frac{B}{H}$ (20)

Mit $k_V = k_H = k$ ergibt sich der maximale Verjüngungsfaktor aus:

$$b_{(x=1)} = 2s \text{ bzw. } 2s = B(1-k_{max}): 0 \le k \le 1-2s/B$$
 (21)

Flächenträgheitsmomente:

$$J_{y}^{R} = \frac{1}{6} \left[sH^{2} (3B+H)(1-k\frac{\xi}{l})^{3} - 6s^{2}H(B+H)(1-k\frac{\xi}{l})^{2} + 4s^{3}(B+3H)(1-k\frac{\xi}{l}) - 8s^{4} \right]$$
 (22)

$$J_z^R = \frac{1}{6} \left[sB^2 (3H + B)(1 - k\frac{\xi}{l})^3 - 6s^2 B(H + B)(1 - k\frac{\xi}{l})^2 + 4s^3 (H + 3B)(1 - k\frac{\xi}{l}) - 8s^4 \right]$$
 (23)

Querschnittsfläche:

$$A^{R}(\xi) = bh - (b-2s)(h-2s) = 2s(b+h-2s) = 2s[(B+H)(1-k\frac{\xi}{l})-2s]$$
 (24)

Masse:

$$m^{R} = \rho \int_{V} dV = \rho \int_{0}^{l} A^{R}(\xi) d\xi = \rho 2sl[(H+B)(1-\frac{k}{2})-2s]$$
 (25)

Biegemomente:

$$M_{y}^{R}(x) = -\Psi[2\rho s \int_{x}^{l} [(B+H)(1-k\frac{\xi}{l})-2s](\xi-x)\xi d\xi + I_{2,C_{2}y} + m_{2}r_{2}(r_{2}-x)$$

$$+ \frac{\rho}{6} \int_{x}^{l} [sH^{2}(3B+H)(1-k\frac{\xi}{l})^{3} - 6s^{2}H(B+H)(1-k\frac{\xi}{l})^{2} + 4s^{3}(B+3H)(1-k\frac{\xi}{l}) - 8s^{4}]d\xi] \qquad (26)$$

$$-\rho g 2s \int_{x}^{l} [(B+H)(1-k\frac{\xi}{l})-2s](\xi-x)d\xi - m_{2}g(r_{2}-x)$$

$$M_{z}^{R}(x) = -\ddot{\theta} \left[2\rho s \int_{x}^{l} \left[(H+B)(1-k\frac{\xi}{l}) - 2s \right] (\xi-x)\xi d\xi + I_{2,C_{2}z} + m_{2}r_{2}(r_{2}-x) \right] + \frac{\rho}{6} \int_{x}^{l} \left[sB^{2}(3H+B)(1-k\frac{\xi}{l})^{3} - 6s^{2}B(H+B)(1-k\frac{\xi}{l})^{2} + 4s^{3}(H+3B)(1-k\frac{\xi}{l}) - 8s^{4} \right] d\xi$$
(27)

Die Integration von (26) und (27) gibt:

$$M_{y}^{R}(x) = -\Psi[2\rho s[-(H+B)\frac{k}{12l}x^{4} + \frac{1}{6}(H+B-2s)x^{3} + l^{2}[(H+B)(\frac{k}{3} - \frac{1}{2}) + s]s + l^{3}[(H+B)(\frac{1}{3} - \frac{k}{4}) - \frac{2s}{3}]]$$

$$+I_{2,C_{2},y} + m_{2}r_{2}(r_{2} - x) + \frac{\rho}{6}[\frac{sH^{2}}{4}(H+3B)[(\frac{k}{l})^{2}x^{3} + 2(\frac{k}{l})x^{2} - 4x - lk^{3} - 4lk^{2} - 2lk + 4l]$$

$$-2s^{2}H(H+B)[-(\frac{k}{l})^{2}x^{3} + 3\frac{k}{l}x^{2} - 3x + lk^{2} - 3lk + 3l] + 2s^{3}(3H+B)(\frac{k}{l}x - 2x - lk + 2l) + 8s^{4}(x - l)]]$$

$$-2g\rho s[-(H+B)\frac{k}{6l}x^{3} + \frac{1}{2}(H+B-2s)x^{2} + l[(H+B)(\frac{k}{2} - 1) + 2s]x + l^{2}[(H+B)(\frac{1}{2} - \frac{k}{3}) - s]] - m_{2}g(r_{2} - x)$$

$$(28)$$

$$M_{z}^{R}(x) = -\tilde{\Theta}[2\rho s[-(B+H)\frac{k}{12l}x^{4} + \frac{1}{6}(B+H-2s)x^{3} + l^{2}[(B+H)(\frac{k}{3}-\frac{1}{2}) + s]s + l^{3}[(B+H)(\frac{1}{3}-\frac{k}{4}) - \frac{2s}{3}]]$$

$$+I_{2,C_{2}x} + m_{2}r_{2}(r_{2}-x) + \frac{\rho}{6}[\frac{sB^{2}}{4}(B+3H)[(\frac{k}{l})^{2}x^{3} + 2(\frac{k}{l})x^{2} - 4x - lk^{3} - 4lk^{2} - 2lk + 4l]$$

$$-2s^{2}B(B+H)[-(\frac{k}{l})^{2}x^{3} + 3\frac{k}{l}x^{2} - 3x + lk^{2} - 3lk + 3l] + 2s^{3}(3B+H)(\frac{k}{l}x - 2x - lk + 2l) + 8s^{4}(x-l)]]$$
(29)

Da die Differentialgleichungen für die Biegelinie für die Aufwärtsbewegung in einer Vertikalebene

$$w''(x) = -\frac{M_y(x)}{EJ_y(x)}$$
 mit den Randbedingungen $w_{x=0} = 0$ und $w'_{x=0} = 0$ (30)

und für die Querbewegung in einer Horizontalebene

$$u''(x) = \frac{M_z(x)}{EJ_z(x)} \quad \text{mit den Randbedingungen} \quad u_{x=0} = 0 \quad \text{und} \quad u'_{x=0} = 0 \quad (31)$$

bei veränderlichem Querschnitt nicht mehr in geschlossener Form integriert werden können, wird auf Zahlenbeispiele übergegangen, die mit Hilfe numerischer Integrationen ausgeführt werden.

Die verwendeten Zahlenwerte wurden mit Hilfe der Unterlagen über den Puma 560 Roboter abgeschätzt:

$$\ddot{\psi} = \ddot{\theta} = 8 \text{ rad/s}^2$$
, $m_2 = 11 \text{ kg}$, $I_{2,C2,v} = I_{2,C2,z} = 0.8 \text{ kgm}^2$, $r_2 = 0.75 \text{ m}$, $l = 0.43 \text{ m}$.

Die Durchbiegungen in vertikaler bzw. horizontaler Richtung wurden durch numerische Integration der Gleichungen (30) bzw. (31) mit Hilfe des Programmpakets MATLAB bestimmt. Da die entsprechenden zu integrierenden Ausdrücke für den elliptischen bzw. rechteckigen Hohlquerschnitt zu lang sind (siehe Gl. (16) und (10), (17) und (11) bzw. (28) und (22), (29) und (23)), war es erforderlich, die Integration unter Aufruf von jeweils vier bzw. drei in MATLAB erstellten Unterprogrammen durchzuführen. Nach der Bestimmung der Durchbiegung am Gliedende unter Einfluß des jeweiligen Momentenanteils, werden diese für jeden Einzelfall nach dem Prinzip der Überlagerung der Kräftebzw. Momentenwirkungen (Superpositionsprinzip) addiert. Die Lösung der Differentialgleichung zweiter Ordnung (doppelte Integration) erfolgt als Lösung eines daraus entstandenen Systems von zwei gekoppelten Differentialgleichungen erster Ordnung.

3. Optimierung der Armkonstruktion

Bei der Optimierung der Konstruktion eines Robotergliedes versuchen wir zuerst ein optimales Höhe zu Breite Verhältnis des Armquerschnittes für beide in Betracht gezogenen Querschnittsformen je nach den bestimmten Bedingungen festzulegen. Der Ellipsenund Rechteck-Hohlquerschnitt werden miteinander verglichen. Weiters ist ein geeigneter Verjüngungsfaktor zu bestimmen. Solche "optimierte" Träger sollen weiter unter Verwendung verschiedener Materialien untersucht werden. Schlußendlich können Masseneinsparungen durch Variation der Qurschnittsabmessungen und Wandstärke abgeschätzt werden.

In den folgenden Abbildungen bedeuten:

--, -- Größen des elliptischen Hohlquerschnittes in vertikaler bzw. horizontaler Richtung
--, ++ Größen des rechteckigen Hohlquerschnittes in vertikaler bzw. horizontaler
Richtung

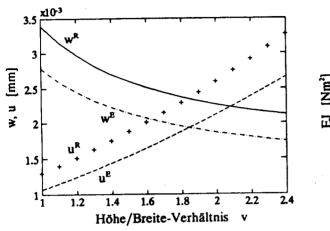
3.1 Bestimmung des optimalen Höhe zu Breite -Verhältnisses

Für gleiche vertikale und horizontale Drehbeschleunigungen ist das Biegemoment M_y um die Gewichtsterme (letzte Zeile in der Gleichung (5)) größer als das Biegemoment M_z gemäß Gleichung (6). Um gleiche Durchbiegungen in beide Richtungen zu erreichen sind symmetrische geschlossene Hohlquerschnitte mit einer Höhe größer als die Breite zu verwenden.

Zunächst wird versucht das optimale Höhe/Breite-Verhältnis v des Trägers ohne Verjüngung (k=0), mit konstanter Wandstärke s und konstanter Querschnittsfläche A zu bestimmen.

Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Durchbiegungen w bzw. u am Gliedende x=l in

vertikaler bzw. horizontaler Richtung für Träger mit Ellipsen- (Index E) und Rechteck-Hohlquerschnitt (Index R). Unter diesen Bedingungen weisen beide Querschnittsformen ungefähr dasselbe optimale Verhältnis: v_{opt}^{E} (=A/B)=1.846, v_{opt}^{R} (=H/B)=1.837 auf, bei dem diese beiden Durchbiegungen gleich werden.



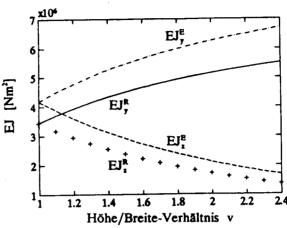


Abb. 2 Durchbiegungen (Beisp.1)

Abb. 3 Biegesteifigkeiten (Beisp.2)

Außerdem merkt man, daß bei demselben Flächenquerschnitt (gleiche Masse) der Ellipsen-Hohlquerschnitt größere Biegesteifigkeiten (d.h. größere Flächenträgheitsmomente) als der Rechteck-Hohlquerschnitt (Abb. 3) (auch bei v=1: Kreis- bzw. quadratischer Hohlquerschnitt) hat. Das führt bei ungefähr gleichen Massenkräften zu kleineren Durchbiegungen am äußeren Trägerende beim Ellipsen- als beim Rechteck-Querschnitt, für alle Höhe/Breite -Verhältnisse.

Der Fehler, der durch die Vernachlässigung des Terms (4) für die Drehung der Querschnitte um ihre eigenen Achsen entsteht, liegt allerdings nur im Bereich 0,20 + 0,75%.

Beispiel 2 Werkstoff: Aluminium

$$E = 7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$

$$A = 3.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$
 $\bar{\psi} = \ddot{\theta} = 8 \text{ rad/s}^2$
 $s = 6 \text{ mm}$ $k = 0$

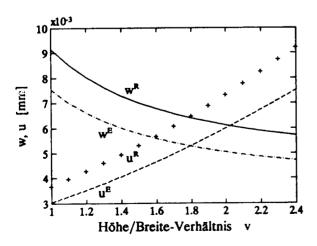


Abb. 4 Durchbiegungen (Beisp.2)

Das optimale Verhältnis Höhe zu Breite hängt natürlich auch vom Werkstoff (E-Modul und Dichte) ab. Unter den gleichen geometrischen Bedingungen und Winkelbeschleunigungen weist der Träger aus Aluminium ein anderes optimales Höhe/Breite-Verhältnis für beide Querschnittsformen ($v_{opt}^E = 1.793$, $v_{opt}^R = 1.787$) auf (Abb. 4).

Beispiel 3 Werkstoff: Aluminium

$$E = 7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \qquad A = 3.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \qquad \psi = \ddot{\theta} = 4 \text{ rad/s}^2$$

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3 \qquad s = 6 \text{ mm} \qquad k = 0$$

Das optimale Höhe zu Breite Verhältnis für gleiche Durchbiegungen in vertikaler und horizontaler Richtung ist in jedem Einzelfall zu bestimmen. Die Unterschiede der Biegemomente in beide Richtungen sollen durch unterschiedliche Biegesteifigkeiten ausgeglichen werden.

Wichtige Einflußfaktoren für das optimale Höhe/Breite -Verhältnis sind die Winkelbeschleunigungen. Für niedrigere (aber untereinander gleiche) vertikale und horizontale Winkelbeschleunigungen ($\ddot{\psi} = \ddot{\theta} = 4 \text{ rad/s}^2$) wird der Anteil des Schweremomentes zum gesamten Biegemoment größer. Daher bekommt man für den Träger vom Beispiel 2 ein höheres optimales Verhältnis Höhe zu Breite ($\mathbf{v}_{\text{opt}}^{\text{E}} \doteq \mathbf{v}_{\text{opt}}^{\text{R}} \doteq 2.39$) (Abb. 5).

Die Abhängigkeit des optimalen Verhältnisses von Höhe zu Breite von der Drehbeschleunigung für den elliptischen Träger in diesem Fall wird in Abbildung 6 dargestellt.

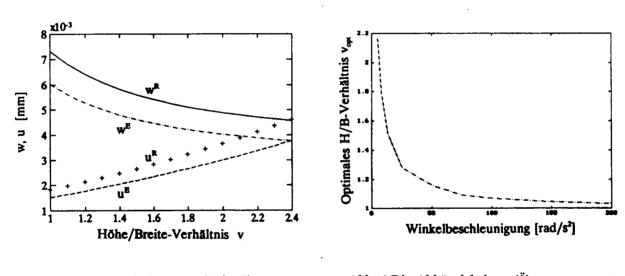


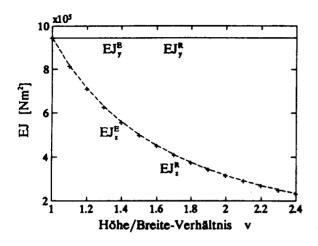
Abb. 5 Durchbiegungen (Beisp.3)

Abb. 6 Die Abhängigkeit $v_{opt}(\theta)$

Beispiel 4 Werkstoff: Aluminium
$$E = 7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \qquad J_y^E = J_y^R = 1.33 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ (=konst)} \quad \ddot{\psi} = \ddot{\theta} = 8 \text{ rad/s}^2$$

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3 \qquad s = 6 \text{ mm} \qquad k = 0$$

Wir nehmen an, daß die Steifigkeit eines Gliedes mit Kreis- bzw. Rechteck-Hohlquerschnitt für die Aufwärtsbewegung in einer Vertikalebene vorerst für eine bestimmte erlaubte Durchbiegung am äußeren Gliedende bestimmt wurde (Abb. 7). Man kann in diesem Fall 11% Masse einsparen, indem man, durch eine engere Gestaltung in der Breite des Robotergliedes, dieselbe Durchbiegung auch in der horizontalen Ebene erzielt (Abb. 8).



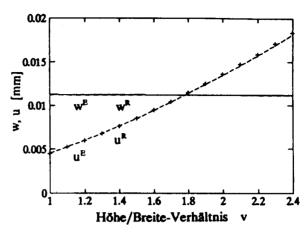


Abb. 7 Biegesteifigkeiten (Beisp.4)

Abb. 8 Durchbiegungen (Beisp.4)

Beispiel 5 Werkstoff: Stahl
$$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2 \qquad J_y^E = J_y^R \qquad \qquad \dot{\psi} = \ddot{\theta} = 8 \text{ rad/s}^2$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3 \qquad \qquad s = 6 \text{ mm} \qquad \qquad k = 0$$

In diesem Fall wird die Querschnittsfläche $A^E=3.84\times10^{-3}$ m² des Ellipsen-Hohlquerschnittes konstant gehalten. Mit der Variation des Höhe/Breite-Verhältnisses werden die Abmessungen des Rechteck-Hohlquerschnittes bei konstanter Wandstärke s=6 mm so bestimmt, daß sein Flächenträgheitsmoment J_y^R gleich dem Flächenträgheitsmoment J_y^E des Ellipsenquerschnittes ist. Es gilt dann auch $J_z^E=J_z^R$ (Abb. 9). Die Querschnittsfläche des Rechteckquerschnittes (somit auch die Masse des Trägers) ist aber bei gleichen Flächenträgheitsmomenten größer als die des Ellipsenquerschnittes. Bei fast gleichen Enddurchbiegungen (Abb. 10) weist der Ellipsenquerschnitt eine um 6.3% kleinere Masse auf, d.h. ist günstiger als der Rechteckquerschnitt (Abb. 11). Die Enddurchbiegungen des Robotergliedes mit Rechteckquerschnitt liegen, wegen der etwas höheren Massen- und Schweremomente, etwas höher als die entsprechenden Durchbiegungen des Ellipsenquerschnittes (Abb. 10).

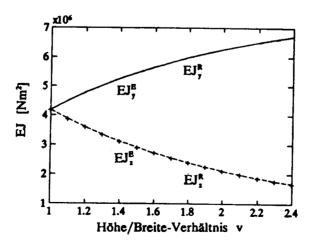
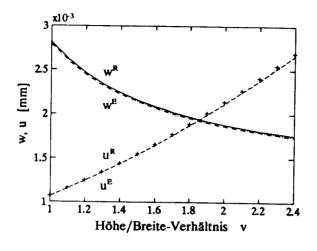


Abb. 9 Biegesteifigkeiten (Beisp.5)



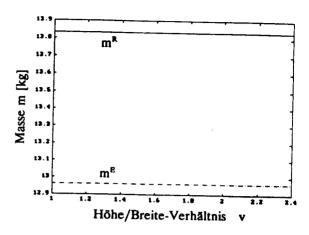


Abb. 10 Durchbiegungen (Beisp.5)

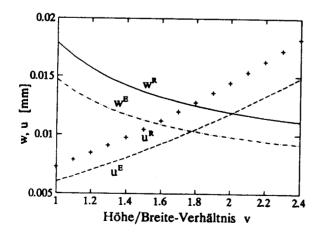
Abb. 11 Gliedermassen (Beisp.5)

$$\dot{E} = 7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$
 $A = 3.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ $\dot{\psi} = \ddot{\theta} = 8 \text{ rad/s}^2$ $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ $s = 6 \text{ mm}$ $k = 0$ Doppelte Last: $m_2 = 22 \text{ kg}$, $I_{2,C2,y} = I_{2,C2,z} = 1.6 \text{ kgm}^2$

Beispiel 7 Werkstoff: Aluminium (vgl. Beispiel 2)

E =
$$7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$
 A = $3.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ψ = $\ddot{\theta}$ = 8 rad/s^2 ρ = 2700 kg/m^3 s = 6 mm k = 0 Dreifache Last: m_2 = 33 kg , $I_{2,C2,y}$ = $I_{2,C2,z}$ = 2.4 kgm^2

Das optimale Höhe/Breite-Verhältnis ist nur gering von der Nutzlast abhängig. Bei doppelter Last (Beispiel 6) wird dieses Verhältnis von $v_{opt} = 1.79$ (Beispiel 2) auf $v_{opt} = 1.78$ (Abb. 12) und bei dreifacher Last auf $v_{opt} = 1.77$ (Abb. 13) verringert. Die Durchbiegung nimmt aber stark zu: bei doppelter Last um 98% und bei dreifacher Last um 192%.



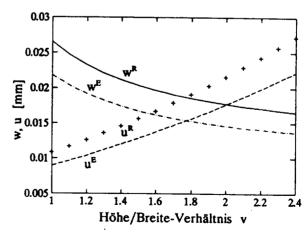


Abb. 12 Durchbiegungen (Beisp.6)

Abb. 13 Durchbiegungen (Beisp.7)

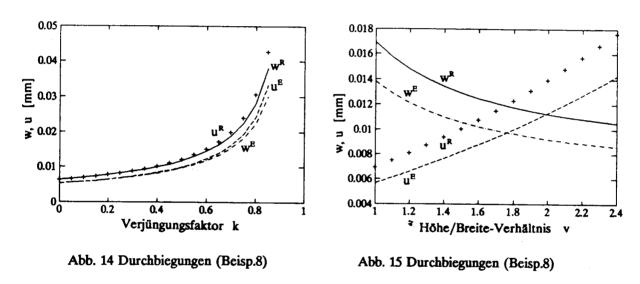
3.2 Wahl des günstigsten Verjüngungsfaktors

Die weiter in Betracht gezogenen Träger aus Aluminium mit Ellipsen- und Rechteck-Hohlquerschnitt haben gleiche Querschnitte an der Einspannstelle und sind mit dem optimalen Höhe/Breite Verhältnis ($v_{opt}^E = 1.793$, $v_{opt}^R = 1.787$, bei $\tilde{\psi} = \ddot{\theta} = 8 \text{ rad/s}^2$) gestaltet.

Beispiel 8 Werkstoff: Aluminium
$$E = 7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \qquad A_1 = 3.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \qquad \tilde{\psi} = \ddot{\theta} = 8 \text{ rad/s}^2$$

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3 \qquad s = 6 \text{ mm} \qquad k \neq$$

In Abbildung 14 merkt man, daß mit größer werdendem Verjüngungsfaktor die Durchbiegungen in vertikaler und horizontaler Richtung für beide Querschnittsformen voneinander abweichen. Das heißt, daß das optimale Höhe/Breite-Verhältnis auch vom Verjüngungsfaktor gering abhängt. Unter denselben anderen Bedingungen wie im Beispiel 2 (k=0, $v_{opt}^E=1.793$) wird dieses Verhältnis z.B. bei k=0.5 $v_{opt}^E=1.762$ (Abb. 15).



Die Masse des Gliedes nimmt mit wachsendem Verjüngungsfaktor linear ab, die Verläufe der Durchbiegungen hingegen werden immer steiler, besonders ab k=0.5+0.6. Ein Verjüngungsfaktor $k \le 0.5$ wäre also günstig.

Ein hohlelliptisches Glied aus Stahl mit der großen Halbachse A=100 mm, Wandstärke s=6 mm, ohne Verjüngung (k=0), mit einer Masse m=9.487 kg und optimales Höhe zu Breite-Verhältnis $v_{opt}=1.815$ hat unter den Belastungsbedingungen von Beispiel 1 eine Enddurchbiegung $w=u=4.77\times10^3$ mm. Mit einem Verjüngungsfaktor k=0.5 würde ein Glied für dieselbe Enddurchbiegung w bzw. u eine $A_1=120$ mm (große Halbachse an der Einspannstelle), s=6 mm, $v_{opt}=1.78$ und m=8.562 kg benötigen.

Durch diese Verjüngung mit k=0.5 kann man in diesem Fall 9.75% Masse einsparen.

3.3 Untersuchung verschiedener Werkstoffe

Der Trend zu immer leichteren Robotern und somit zu einer Verbesserung des Verhältnisses von Nutzlast zu Eigengewicht des Roboters führt zwangsläufig zur Verwendung neuartiger Werkstoffe und Konstruktionen. Da es in einigen Bereichen der Technik, wie zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt, schon immer das Bestreben gab, Konstruktionen zu verwenden, die geringes Gewicht mit hoher Steifigkeit und Festigkeit verbinden, liegt es nahe, die dort verwendeten Konstruktionsprinzipien und Materialien auch in der Robotik zu nützen.

Bekannte Werkstoffe sind Aluminium und die Eisenmetalle. Verbundwerkstoffe wie GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff) und CFK (Kohlenfaserverstärkter Kunststoff) sind bereits länger bekannt, aber manche, wie z.B. CFK noch selten in Gebrauch, nicht zuletzt wegen ihrer derzeit noch hohen Kosten. Völlig neue Werkstoffe sind Verbundwerkstoffe mit metallischer Matrix oder einer Matrix, die aus keramischen Stoffen besteht, sowie einige neuentwickelte hochfeste Polymere.

Wie bereits oben erwähnt, ist der Kostenfaktor derzeit noch eines der größten Hindernisse für den Einsatz dieser neuen Werkstoffe. Man wird also danach trachten, daß die Gewichtsabnahme wenigstens groß genug ist, um die höheren Materialkosten auszugleichen. Ein wesentlicher Vorteil der Leichtbaumaterialien liegt sicher in ihren geringeren Bearbeitungskosten. Die Kosten eines Teiles, welcher aus leichterem Material gefertigt ist, hängen von der Gewichtseinsparung und vom Kostenunterschied zum ersetzten Material ab.

Zwei Materialkennwerte sind verantwortlich für das Durchbiegungs-Masse-Verhältnis: der Elastizitätsmodul E und die Dichte ρ . Grundsätzlich bringt eine Vergrößerung des Elastizitätsmoduls E eine Erhöhung der Biegesteifigkeit EJ und damit eine Verringerung der Durchbiegung mit sich. Jedoch muß dies gemeinsam mit der Veränderung der Dichte untersucht werden, da eine Änderung des Elastizitätsmoduls mit einer Änderung des Werkstoffs verbunden ist, der wiederum eine andere Dichte aufweist. Zwar ist eine Änderung des E-Moduls bei annähernd gleicher Dichte zum Beispiel bei Stahl möglich, doch sind die dadurch bewirkten Veränderungen der Durchbiegung so gering, daß mit guter Näherung mit dem üblicherweise verwendeten Mittelwert von $E=2.1\times10^{11}~N/m^2$ gerechnet werden kann (Walser, 1991).

Besonders bei der Berechnung der Masse stößt man auf die oben erwähnte Tatsache der Koppelung zwischen der Dichte und der E-Modul, da sich - aufgrund des anderen Werkstoffes - die Masse ändert, obwohl der Elastizitätsmodul in der Gleichung zur Berechnung der Masse gar nicht aufscheint.

Die Gleichung für die Durchbiegung zeigt, daß aber auch der Elastizitätsmodul allein, also nicht das Verhältnis ρ/E eingeht. Daher ist ein Werkstoff zur Verringerung der Durchbiegung (zum Beispiel gegenüber der Durchbiegung des Stahlträgers) geeignet, wenn er einen höheren E-Modul als Stahl besitzt, selbst wenn das Verhältnis Dichte zu E-Modul gleich oder vielleicht sogar etwas kleiner ist.

Eine Verringerung der Dichte ρ wirkt sich grundsätzlich positiv auf das Durchbiegungs-Masse Verhältnis aus, da sowohl die Durchbiegung als auch die Masse verringert wird.

Grundsätzlich muß zur Verringerung des Verhältnisses ρ/E gesagt werden, daß dies nur dann zielführend ist, wenn der Elastizitätsmodul nicht zu stark gegenüber dem E-Modul des Vergleichswerkstoffes abnimmt, beziehungsweise wenn die Dichte stark verringert wird, da diese in die Masse eingeht.

Würde das Material bis zur Fließgrenze als Versagenskriterium oder sogar darüber hinaus in den elasto-plastischen Bereich belastet, wie es bei vielen Leichtbaukonstruktionen der Fall ist, so könnte die Masse über die auftretende Spannung bestimmt werden. Da aber im Roboterbau die Konstruktionen nicht durch die Festigkeitsrechnung, sondern vielmehr über die Steifigkeit und zulässige Verformung beziehungsweise geforderte Genauigkeit erfolgt, sind die in den Robotergliedern auftretenden Spannungen sehr gering. Somit sind die üblichen Aussagen über Leichtmetalle und ihre Eigenschaften nicht ohne weiters auf den Einsatz im Roboterbau übertragbar. Titan zum Beispiel, das zwar ein sehr teueres, aber wegen seiner hohen Zugfestigkeit, seines relativ hohen E-Moduls und seines relativ geringen Gewichts ein sehr guter Leichtbauwerkstoff ist und daher auch im Flugzeugbau und in der Raumfahrt Einsatz findet, schneidet - wie die nachfolgenden Beispiele zeigen - im Vergleich mit anderen Leichtmetallen nicht so gut ab. Die Reserve zwischen den auftretenden und der maximal ertragbaren Belastung ist zu groß. Der Werkstoff wird, wie es auch bei Stahl der Fall ist, nicht ausgenützt.

Nicht berücksichtigt werden hier Werkstoffeigenschaften wie etwa Hitzebeständigkeit, Alterungsverhalten, Beständigkeit gegen aggressive Medien und dergleichen oder Material- und Bearbeitungskosten. Diese können unter Umständen Kriterien für die Werkstoffwahl darstellen, man denke nur an einen Robotereinsatz in der Nähe von Öfen oder bei Bränden, oder an die Zersetzung diverser Kunststoffe durch Lacklösungsmittel.

Weitere Betrachtungen sind nur noch an Beispielen anschaulich und zweckmäßig. Es werden Roboterglieder unterschiedlicher Abmessungen aus den derzeit üblichen Leichtmetallen Aluminium, Magnesium und Titan sowie Verbunden mit Metall- bzw. Kunststoffmatrix hinsichtlich ihrer Massen und Durchbiegungen analysiert.

Leichtmetalle

Aluminium: Die üblichen Aluminiumlegierungen haben eine durchschnittliche Dichte von nur 2700 kgm⁻³, dem gegenüber steht aber der Nachteil des geringen E-Moduls (E=7.1×10¹⁰ N/m²), der ca. ein Drittel des E-Moduls von Stahl beträgt.

Magnesium: Die charakteristischen Werte von Magnesium und dessen Legierungen können mit $\rho = 1800 \text{ kgm}^{-3}$ und $E = 4.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ angenommen werden.

Titan: Titan und Titanlegierungen haben in etwa die gleichen Werte für Dichte und Elastizitätsmodul; $\rho = 4500 \text{ kgm}^{-3}$, $E = 1.05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

Verbundwerkstoffe

Sind bei gewissen Anwendungen Kombinationen von Eigenschaften gefragt, die kein Material allein bieten kann, so können Verbundwerkstoffe das geeignete Material sein. In der heutigen Zeit war, wie auch in vielen anderen Fällen, die Luft- und Raumfahrtindustrie die treibende Kraft bei der Entwicklung dieser Werkstoffe. Die Eigenschaften, die in diesem Bereich gefordert werden, wie zum Beispiel Festigkeit, geringes Gewicht, Dauerschwingfestigkeit, Temperaturbeständigkeit usw., sind auch für die Robotik von Interesse.

Faserverbundwerkstoffe sind Materialien, bei denen in den Matrixwerkstoffen Fasern in Form von Strängen, kurzen Fasern, zwei- oder dreidimensionalen Geflechten oder auch nur Partikel eingebettet sind.

Es stellt sich nun die Frage, mit welchem Elastizitätsmodul Berechnungen für Roboterarme aus Verbundwerkstoffen durchzuführen sind. Das mechanische Verhalten ergibt sich aus dem Zusammenwirken von Fasern und Matrix (Urbanek, 1988). Für einen vorgegebenen Verbund kann man aus dem Anteil bzw. der Anordnung der Fasern mittels halbempirischer Formeln einen mittleren E-Modul errechnen. Es ergeben sich für die Richtungen quer zur Faserrichtung (Serienschaltung zwischen Faser und Matrix) und längs der Faserrichtung (Parallelschaltung zwischen Faser und Matrix) unterschiedliche Elastizitätsmoduli. Der Werkstoff ist anisotrop.

Bei der Adaption der Verbundwerkstoffe für Roboter wird man die Fasern selbstverständlich in Trägerlängsachse ausrichten. Theoretisch besteht noch die Möglichkeit, in der oberen Hälfte des Trägerquerschnittes die Faseranzahl zu erhöhen, um die Biegebelastung durch den statischen Gewichtsanteil zu kompensieren. Doch wird in der vorliegenden Arbeit nur der Fall einer gleichmäßigen Faserverteilung über den Querschnitt behandelt. Schwierigkeiten bei einem Roboter mit ungleichmäßiger Faserverteilung würden nämlich dann auftreten, wenn der Roboter zum Beispiel hängend montiert wird. Eine Neukonstruktion des Roboters wäre notwendig.

Für den Fall der Beanspruchung der Fasern in Längsrichtung ergibt sich bei vielen Verbundwerkstoffen ein linearer bzw. annähernd oder stückweise linearer Bereich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Das heißt also, daß ein HOOKEscher Bereich vorhanden ist und daher die Methode der Bestimmung der Durchbiegung über die Integration der Differentialgleichung der Biegelinie ihre Gültigkeit behält.

Verbunde mit Kunststoffmatrix: Als Matrixwerkstoffe werden bevorzugt Epoxid- und Polyesterharze verwendet. Da diese jedoch eine geringe Festigkeit und Steifigkeit besitzen ($\sigma_B = 1.5 + 3.5 \times 10^9$ N/m², $E = 7 \times 10^{10} + 3 \times 10^{11}$ N/m²) in einem Verbund eingesetzt. Bei den Fasern kommt Glas, Carbon und Bor zum Einsatz. Durch den Einsatz von Hoch- und Ultrahochmodulfasern läßt sich ein E-Modul erzielen, der zwischen 1.17×10^{11} und 1.52×10^{11} N/m² liegt. Mit den Carbonfaser GY-70 läßt sich für einen unidirektionalen Verbund sogar ein E-Modul von 2.9×10^{11} N/m² erreichen. Die Werkstoffdaten wurden aus der Literatur (Grayson und Wiley, 1983) entnommen.

Verbunde mit Metallmatrix: Als Alternative zu der Polymer-Matrix kann eine Metall-, Keramik- oder Kohlenstoff-Matrix verwendet werden, jedoch sind diese noch sehr junge Werkstoffe zum Teil technisch noch nicht ausgereift. Verwendet werden Fasern aus Kohlenstoff, Borfasern sowie SiC Fasern. SiC wird auch in der Form von Whiskers eingesetzt. (Whiskers sind einzelne Kristalle, welche praktisch keine Gitterfehler aufweisen).

Als Matrixmetalle kommen Al, Mg und Ti sowie Legierungen aus diesen Metallen zum Einsatz. Diese Verbunde liegen mit ihrer Dichte teilweise sogar unter jener der Leichtmetalle. Das läßt sich so erklären, das diese Verbunde einen Faseranteil aufweisen, der zwischen 30% und 50% schwankt, und diese Fasern eine geringere Dichte besitzen als die Leichtmetalle. Man hat also einen Werkstoff zur Verfügung, der leichter ist als Stahl, ihn aber an Steifigkeit teilweise übertrifft. Für die Berechnungen wurden die Daten der Werkstoffe aus der facheinschlägigen Literatur (Schoutens, 1982) entnommen.

Zur Untersuchung verschiedener Materialien wurde ein hinsichtlich der Querschnittsform, des Höhe/Breite Verhältnisses und Verjüngungsfaktors optimiertes Modell verwendet. Es wurde ein Ellipsen-Hohlquerschnitt und ein Verjüngungsfaktor k=0.5 verwendet. Das optimale Verhältnis Höhe zu Breite, für welche sich gleiche vertikale und horizontale Durchbiegung ergibt, wird jedes Mal iterativ berechnet. Die dynamischen Untersuchungen sind für eine Drehbeschleunigung $\bar{\psi}=\bar{\theta}=30$ rad/s² (fast viermal größer als bei Puma 560, was bei schnelleren Leichtrobotern zu erwarten ist) durchgeführt.

Als Trägheitsmoment an der Einspannstelle für ein verjüngtes elliptisches Glied aus Stahl wurde $J_{1,St}^E = 1.3 \times 10^{-5}$ m⁴ angenommen. Unser Ziel ist die mögliche Ersparnis an Masse durch Verwendung von Leichtbauwerkstoffen unter Beibehaltung der Steifigkeit, d.h. bei gleicher Durchbiegung am Gliedende, zu bestimmen. Glieder verschiedener Werkstoffe mit derselben Biegesteifigkeit EJ weisen nur ungefähr aber nicht genau die selbe Durchbiegung auf, weil sich das Biegemoment durch Veränderung der Abmessungen und der Werkstoffdichte ändert.

Zum Unterschied zu den 'statischen' Vergleichen von Gliedern mit nur gleicher Biegesteifigkeit in (Urbanek, 1988) gilt hier für die dynamischen Untersuchungen die Bedingung derselben Durchbiegung (des optimierten Gliedes). Nach Einsetzen der entsprechenden Werkstoffdaten E und ρ wird das neue Flächenträgheitsmoment an der Einspannstelle $J_{1,Mat}^E = J_{1,St}^E \times E_{St}/E_{Mat}$ mit einem veränderlichen Koeffizient c multipliziert. Durch Veränderung von v und c werden die Integrationen iterativ durchgeführt, bis dieselbe Durchbiegung wie die des Gliedes aus Stahl erreicht wird.

3.3.1 Veränderung der Wandstärke

Es werden zuerst Glieder aus verschiedenen Werkstoffen mit denselben Außenabmessungen (große Ellipsenhalbachse A=110 mm, Tab. 1) untersucht. Die Wandstärke wird dann vor jedem Iterationsschritt als Nullstelle des Polynoms vierter Ordnung $s=s(J_{1,Mat}^{E}, A, v)$ bestimmt.

Einsatz von Leichtmetall bringt unter diesen Bedingungen (gleiche Durchbiegungen am Gliedende, gleiche große Ellipsenhalbachse) keine Massenersparnis: der Träger aus Aluminium, Magnesium bzw. Titan wäre 11%, 40% bzw. 20% schwerer als jener aus Stahl (Tab. 1). Für größere Steifigkeiten und kleinere Durchmesser wäre es sogar unmöglich, Stahl durch Magnesium oder Titan zu ersetzen (es ergibt sich s $\$ s_{max}). Es zeigt sich also, daß das Glied aus Stahl, bei gleichen Außenabmessungen, wesentlich günstiger ist als jenes aus Aluminium, Magnesium, Titan oder deren Legierungen.

Der Einsatz von Verbunden mit Kunststoffmatrix zeigt, daß glasfaserverstärkte Kunststoffe keine Alternative zu Stahl sind (8% mehr Masse als Stahl, Tab. 1). Die Verwendung von Carbon-, Bor-, Hoch- und Ultrahochmodulfasern bzw. Carbonfasern GY-70 in Epoxidmatrix bringt Massenersparnisse von 48%, 49%, 59%, 69% bzw. 85% mit sich (Tab. 1).

Bessere Ergebnisse bringt der Einsatz von Verbunden mit Metallmatrix, wodurch Massenersparnisse von 64% bis 81% erzielbar sind (Tab. 1).

	T		r	φ -			,	<u>,</u>	
	Werkstoff	s	Α	E	ρ	w×10 ³	m _i	<u>m,</u>	m ₁ -m ₁
Nr.		mm	mm	Nm ⁻²	kgm ⁻³	mm	kg	<u> </u>	%
1	Stahl	3.84	110	2.1×10 ¹¹	7850	15.339	6.003	1	•
	Leichtmetalle								
2	Aluminium	13,4	110	7.1×10 ¹⁰	2700		6.682	1,11	-11
3_	Magnesium	28.2	110	4.5×10 ¹⁰	1800	.".	8,418	1.40	-40
4	Titan	8,4	110	1.05×10 ¹¹	4500	".	7.209	1.20	-20
	Verbunde mit Kunststoffmatrix							The state of the s	
5	E-Glas / Epoxid	18.4	110	5.7×10 ¹⁰	1970	."_	6.461	1.08	-8
6	Carbon / -"-	10.8	110	8.3×10 ¹⁰	1540	_"_	3,130	0.52	48
7	Bor / -"- SiC / -"-	8.0	110	1.06×10 ¹¹	2000	-"-	3.066	0.51	49
8	HM / -*-	7.1	110	1.17×10 ¹¹	1800	_*_	2,464	0.41	59
9	U HM / -"-	5.3	110	1.52×10 ¹¹	1800	_"-	1.863	0.31	69
10	GY-70 / -"-	2.6	110	2.9×10 ¹¹	1800	_"_	0.928	0.15	85
	Verbunde mit Metallmatrix								
11	GT 50 / 201 Al	4.7	110	1.7×10 ¹¹	2380	_#_	2.187	0.36	64
12	G GY 70 / 201 Al	3.7	110	2.1×10 ¹¹	2380	_"_	1.733	0.29	71
13	SiC / Ti	3.0	110	2.6×10 ¹¹	3930	_*_	2.332	0.39	61
14	GHM pitch/AZ31Mg	2.5	110	3.0×10 ¹¹	1827	.*.	0.907	0.15	85
15	GHM pitch / 6061 Al	2.4	110	3.2×10 ¹¹	2436	_"_	1.161	0.19	81

Tab. 1 Massenersparnisse durch Leichtbauwerkstoffe bei gleichen Außenabmessungen

3.3.2 Veränderung der Querschnitts-Außenabmessungen

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Masse ist die Vergrößerung der Außenabmessungen des Querschnittes der Roboterglieder. Abbildung 16 zeigt die Verringerung der Durchbiegung eines Gliedes bei Vergrößerung der Außenabmessungen bei gleicher Gliedmasse. Eine Vergrößerung der Außenabmessungen z.B. um 50% (von 80 auf 120 mm) bewirkt eine Verringerung der Durchbiegung um 60% bei gleichbleibender Masse. Allerdings muß man bedenken, daß eine Vergrößerung der Querschnitts-Außenabmessungen nur in gewissen Grenzen sinnvoll ist.

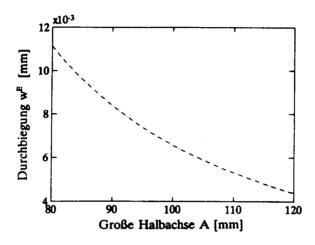


Abb. 16 Einfluß der Außenabmessungen auf die Durchbiegung

Es ist zu beachten, daß mit größer werdenden Außenabmessungen die Widerstandsmomente $W_y = J_y/A$ bzw. $W_z = J_z/B$ abnehmen (Urbanek, 1988), und demzufolge die auftretenden Randfaserspannungen $\sigma_y = M_y/W_y$ bzw. $\sigma_z = M_z/W_z$ zunehmen. Da aber die in den Robotergliedern auftretenden Spannungen sehr gering sind, liegen sie auch nach der Vergrößerung der Querschnitts-Außenabmessungen noch immer weit unter der zulässigen Spannung (Urbanek, 1988).

Im zweiten Durchgang der Untersuchungen verschiedener Werkstoffe wird eine unveränderliche Wandstärke des Gliedes angenommen. Die große Ellipsen-Halbachse A wird vor jedem Iterationsschritt als Wurzel des Polynoms dritter Ordnung $A = A(J_{1,Mat}^E, s, v)$ berechnet.

Unter diesen Bedingungen, d.h. Konstanthaltung der Wandstärke und Vergrößerung der Außenabmessungen für dieselbe Durchbiegung am Gliedende zeigen die Leichtmetalle ihre Vorteile (Tab. 2). Durch eine Vergrößerung der großen Ellipsen-Halbachse von 110 mm bei Stahl auf 156 mm bei Aluminium, 181 mm bei Magnesium bzw. 138 mm bei Titan ist eine Massenersparnis von 51%, 62% bzw. 28% möglich.

	Werkstoff	s	Α	Е	ρ	w×10³	m,	m _i	<u>m₁-m₁</u>
Nr.		mm	mm	Nm ⁻²	kgm ⁻³	mm	kg		™₁ %
1	Stahl	3.8	110	2.1×10 ¹¹	7850	15.332	5.857	1	
	Leichtmetalle								
2	Aluminium	3.8	156	7.1×10 ¹⁰	2700	_"_	2.879	0.49	51
3	Magnesium	3.8	181	4.5×10 ¹⁰	1800	_".	2.235	0.38	62
4	Titan	3.8	138	1.05×10 ¹¹	4500	.".	4.239	0.72	28
	Verbunde mit Kunststoffmatrix								
_5	E-Glas / Epoxid	3.8	168	5.7×10 ¹⁰	1970	_*_	2.268	0.38	62
6	Carbon / -"-	3.8	148	8.3×10 ¹⁰	1540	_"_	1,558	0.27	73
7	Bor / -"- SiC / -"-	3.8	137	1.06×10 ¹¹	2000		1.870	0.32	68
8	HM / -"-	3.8	132	1.17×10 ¹¹	1800	-"-	1.620	0.28	72
9	U HM / -"-	3.8	121	1.52×10 ¹¹	1800	_*_	1.482	0.25	75
_10	GY-70 / -*-	3.8	99	2.9×10 ¹¹	1800	_"_	1.209	0.21	79
	Verbunde mit Metallmatrix								
11	GT 50 / 201 Al	3.8	117	1.7×10 ¹¹	2380	e ;	1.894	0.32	68
12	G GY 70 / 201 Al	3.8	109	2.1×10 ¹¹	2380		1.761	0.30	70
13	SiC / Ti	3.8	102	2.6×10 ¹¹	3930	.**_	2.716	0.46	54
14	GHMpitch/AZ31Mg	3.8	97	3.0×10 ¹¹	1827		1.199	0.20	80
15	GHMpitch/6061 Al	3.8	95	3.2×10 ¹¹	2436	_"_	1.568	0.27	73

Tab. 2 Massenersparnisse durch Leichtbauwerkstoffe bei Veränderung der Außenabmessungen

Größere Massenreduktionen durch Vergrößerung der Außenabmessungen des Querschnitts (Tab. 2) als durch die Variation der Wandstärke kann man auch mit der Verwendung von Verbundwerkstoffen erzielen. Bemerkenswert sind die Fälle der Verbundwerkstoffe GY-70/Epoxid, G HM pitch/AZ 31 Mg und G HM pitch/6061 Al, die bei der ersten Untersuchung mit gleichen Außenabmessungen des Querschnitts kleinere Wandstärke als bei Stahl benötigen (Tab. 2). Mit der gleichen Wandstärke wie bei Stahl benötigen diese Werkstoffe kleinere Querschnittsabmessungen (Tab. 2). Die Massenersparnis in diesem Fall ist aber, im Unterschied zu den anderen Werkstoffen, kleiner als beim ersten Gang der Untersuchungen mit denselben Außendimensionen (vgl. Tab. 1 und Tab. 2).

4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

In diese Arbeit wurden Möglichkeiten gesucht, die Massen der auf Biegung beanspruchten Armglieder eines Roboters durch geometrisch geeignete Formgebung und unter Verwendung verschiedener Werkstoffe zu minimieren. Es wurde ein Roboterglied mit linear abnehmenden Außenabmessungen des Querschnitts unter dem Einfluß von Eigengewicht, Endbelastung und Trägheitskräften bei beschleunigter Drehung in Betracht gezogen. Die ausführlich aufgestellten Gleichungen der Biegemomente wurden aus dem Schwerpunkt- und Drallsatz für den Ellipsen- und Rechteck-Hohlquerschnitt geschlossen integriert. Die weitere benötigte Integration der Biegeliniengleichungen zur Berechnung der Durchbiegung am Ende des Robotergliedes erfolgte numerisch durch erstellte Programme in MATLAB. Dadurch war es möglich den Einfluß verschiedener geometrischen Parameter, wie Höhe zu Breite Verhältnis v, Verjüngungsfaktor k, Querschnitt-außenabmessungen A bzw. H und der Materialkennwerte E und ρ sowie deren Kombination auf das Durchbiegungs-Masse-Verhältnis zu untersuchen.

Betrachtet wurden zwei geschlossene Hohlprofile: Ellipsen- und Rechteck-Hohlprofil, da diese biegesteifer als Voll- oder offene Profile bei gleicher Masse sind. Die Optimierung der Armkonstruktion beginnt mit der Bestimmung eines optimalen Höhe zu Breite Verhältnisses des Querschnitts. Wegen der zusätzlichen Schwerkräfte bzw. Momente in vertikaler Richtung sind die Abmessungen in dieser Richtung größer als in horizontaler Richtung zu gestalten, um gleiche Durchbiegungen bei gleichen Drehbeschleunigungen in beide Richtungen zu haben. Wie die Untersuchungen zeigen, ist ein solches optimales Verhältnis zuerst von den Drehbeschleunigungen, und etwas weniger von Werkstoff, Nutzlast, Verjüngungsfaktor abhängig. Für Drehbeschleunigungen von 8 rad/s² (entspricht der Größenordnung beim Roboter PUMA 560), ist das optimale Höhe/Breite-Verhältnis ca. 1.8. Durch das Einführen eines optimalen Verhältnisses von Höhe zu Breite kann man bei Beibehaltung einer vorgegebener Biegesteifigkeit für gleiche vertikale und horizontale Drehbeschleunigungen von 8 rad/s² bis zu 11 % Masse einsparen. Es ist empfehlenswert, das optimale Höhe zu Breite Verhältnis für gleiche Durchbiegungen in horizontaler und vertikaler Richtung für jeden Einzelfall zu bestimmen.

Bei der Berechnung der Durchbiegungen wurden auch die Trägheitsmomente der Querschnitte um ihre eigenen Achsen mitberücksichtigt, was bei der Integration rechenaufwendige Terme mit sich bringt. Die Fehlerabschätzung in der dynamischen Simulation zeigte, daß diese Terme nur 0.2% bis 0.75% der Durchbiegung ausmachen.

Der dynamischer Vergleich zwischen Rechteck- und Ellipsen-Hohlquerschnitt zeigte, daß die Querschnittsfläche des Rechteckquerschnittes (somit auch die Masse des Trägers) bei gleichen Flächenträgheitsmomenten größer als die des Ellipsenquerschnitts ist. Bei gleichen Enddurchbiegungen weist also der Ellipsenquerschnitt eine (um 6.3%) kleinere Masse auf, d.h. er ist günstiger als der Rechteckquerschnitt.

Einen längs der Trägerachse abnehmenden Querschnitt wird man als sinnvoll erachten - wie bei einem eingespannten Träger gleicher Festigkeit mit Endlast. Zusätzlich kommt noch die Tatsache hinzu, daß bei einer beschleunigten Drehung Punkte mit einem größeren Abstand vom Drehpunkt einer höheren Beschleunigung ausgesetzt sind und

sich daher in diesem Abstand eine kleinere Masse durch die Querschnittsverjüngung günstig auswirkt. Dem steht jedoch das verringerte Flächen trägheitsmoment gegenüber. Aus der Vielzahl von möglichen Querschnittsabnahmen wird hier der fertigungstechnisch günstige Fall linearer Abnahme der Abmessungen bei gleichen Verjüngungsfaktoren in vertikaler und horizontaler Richtung $(k_V = k_H = k)$ behandelt.

Um bei gleicher Länge und gleicher Durchbiegung eines Robotergliedes unter gleicher Belastung und bei Erhaltung der nötigen Steifigkeit dessen Masse zu reduzieren, besteht außer der passenden Formgebung auch die Möglichkeit der Verwendung leichterer Materialien. Es wurde die Möglichkeit des Einsatzes der derzeit üblichen Leichtmetalle Aluminium, Magnesium und Titan sowie von Verbunden mit Metall- bzw. Kunststoffmatrix zur Reduzierung der Masse eines geometrisch optimierten Robotergliedes untersucht und in Tabellen dargestellt. Da der Kostenfaktor derzeit offenbar noch eines der größten Hindernisse für den Einsatz neuerer Werkstoffe ist, wird man also danach trachten, daß die Massenreduzierung wenigstens groß genug ist, um die höheren spezifischen Materialkosten zu kompensieren. Dabei ist auch zu beachten, daß je nach Material die Bearbeitungskosten geringer sein können.

Zuerst wurden Glieder aus verschiedenen Werkstoffen mit denselben Außenabmessungen und unterschiedlicher Wandstärke untersucht, welche dieselbe Enddurchbiegung aufweisen. Einsatz von Leichtmetall bringt unter diesen Bedingungen keine Massenersparnis: der Träger aus Aluminium, Magnesium bzw. Titan wäre 8%, 40% bzw. 20% schwerer als jener aus Stahl. Für größere Steifigkeiten und kleinere Durchmesser wäre es sogar unmöglich, Stahl durch Magnesium oder Titan zu ersetzen. Es zeigt sich also, daß das Glied aus Stahl, bei gleichen Außenabmessungen, wesentlich günstiger ist als jenes aus Aluminium, Magnesium, Titan oder deren Legierungen. Der Ersatz durch Leichtmetalle, wie Aluminium, Magnesium und Titan erweist sich nur bei Übergang auf relativ große Querschnitte als zielführend.

Unter Einsatz von Verbunden mit Kunststoffmatrix zeigte sich, daß glasfaserverstärkte Kunststoffe keine Alternative zu Stahl sind (8% mehr Masse als Stahl). Die Verwendung von Carbon-, Bor-, Hoch- und Ultrahochmodulfasern bzw. Carbonfasern GY-70 in Epoxidmatrix bringt Massenersparnisse von 48%, 49%, 59%, 69% bzw. 85% mit sich.

Bessere Ergebnisse bringt der Einsatz von Verbunden mit Metallmatrix, wodurch Massenersparnisse von 64% bis 81% erzielbar sind.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Masse ist die Vergrößerung der Außenabmessungen des Querschnittes der Roboterglieder, welche aber nur in gewissen Grenzen sinnvoll ist. Unter den Bedingungen der Konstanthaltung der Wandstärke und Vergrößerung der Außenabmessungen für dieselbe Durchbiegung am Gliedende zeigen die Leichtmetalle ihre Vorteile. Durch eine Vergrößerung der großen Ellipsen-Halbachse von 110 mm bei Stahl auf 156 mm bei Aluminium, 181 mm bei Magnesium bzw. 138 mm bei Titan sind Massenersparnisse von 51%, 62% bzw. 28% möglich.

Größere Massenreduktionen durch Vergrößerung der Außenabmessungen des Querschnitts als durch die Variation der Wandstärke kann man auch mit der Verwendung von Verbundwerkstoffen erzielen. Bemerkenswert sind die Fälle der Verbundwerkstoffe GY-

70/Epoxid, G HM pitch/AZ 31 Mg und G HM pitch/6061 Al, die bei der ersten Untersuchungen mit gleichen Außenabmessungen des Querschnitts kleinere Wandstärke als bei Stahl benötigen. Mit der gleichen Wandstärke wie bei Stahl benötigen diese Werkstoffe kleinere Querschnittsabmessungen. Die Massenersparnis in diesem Fall ist aber, im Unterschied zu den anderen Werkstoffen, kleiner als beim ersten Gang der Untersuchungen mit denselben Außenabmessungen.

Eine Optimierung der Masse der Roboterglieder bei Beibehaltung der Steifigkeit wäre möglich durch die kombinierte Wahl der geeigneten Formgebung und des Werkstoffes.

5. Literaturverzeichnis

- Çaushi, I.D. (1991). Investigations on Leightweight Industrial Robots. In: Robot Control 1991 (Syroco '91). Selected papers from the 3rd IFAC/IFIP/IMACS Symposium, Vienna, Austria, 16-18 Sept. 1991. Pergamon Press, Oxford New-York Seoul Tokyo, 537-541.
- Çaushi, I. (1993). Dynamische Einflüsse von Massen- und Steifigkeitsreduktionen auf die Bewegungsgrössen starrer und elastischer Industrieroboter. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 18 Nr. 120, VDI Verlag, Düsseldorf.
- Desoyer, K., Kopacek, P., Troch, I. (1985). Industrieroboter und Handhabungsgeräte. Verlag Oldenbourg, München.
- Desoyer, K., Kopacek, P. (1982). Industrieroboter: Stand und Entwicklungstendenzen. Berichtband des 8. Österreichischen Automatisierungstages. 22. Oktober 1992, TU-Wien.
- Grayson, M., Wiley, J. (1983). Encyclopedia of Composite Materials and Componentes. New York 1983.
- Schoutens, J.E. (1982). Introduction to Metal Matrix Composite Materials. MMC No.272, DOD Metal Matrix Composite Information Analysis Center Sants Barbara, California.
- Urbaneck, W. (1988). Grundlegende Betrachtungen zur Konstruktion und Auswahl von Materialien für den Bau von Leichtbaurobotern ausreichender Steifigkeit. Diplomarbeit, TU Wien.
- Walser, A. (1991). Grundlegende Analysen für Armkonstruktionen von Leichtrobotern ausreichender Steifigkeit. Diplomarbeit, TU Wien.

LEBENSLÄUFE DER AUTOREN

DIPL.-ING. DR. TECHN. MANFRED BENEDER

Ausbildung:

1984 - 1990:

Studium der Informatik mit dem Schwerpunkt Systemtechnik und

Automatisierung an der Johannes Kepler Universität, Linz. Diplomarbeit im Bereich der angewandten Informatik (Administrationsunterstützung

am Oberlandesgericht Linz).

1990 - 1992:

Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften an der Johannes

Kepler Universität, Linz. Dissertation auf dem Gebiet der Künstlichen

Intelligenz (Wissensbasierte Diagnose).

Berufliche Tätigkeiten:

Ab Juni 1990:

Freier Mitarbeiter der Abteilung für System- & Automatisierungstechnik (SAT) an der wissenschaftlichen Landesakademie für NÖ in Krems (LAK).

Projekte:

-Ein Expertensystem zur Diagnose von Maschinenfehlern in der Fertigung von Schweißtransformatorbauteilen.
-CAD/CAM/CAQ-Kopplung eines Incircuittesters.

Juli1992 - Juni 1993:

Wissenschaftlicher Angestellter der Abteilung für System- &

Automatisierungstechnik an der LAK in Krems

Projekte:

-Datenbanksystem zur Administrationsunterstützung .
-Auftragsbezogene Zeiterfassung (Wochenberichte)

Vorträge, Schulungen und Messepräsentation der SAT/LAK

Lektor an der Johannes Kepler Universität, Linz

Seit Juli 1993:

Vertragsassistent der Abteilung Systemtechnik & Automatiion des Institutes für Systemwissenschaften an der J. Kepler Universität, Linz.

DIPL.-ING. DR. TECHN. MARTIN ZAUNER

Ausbildung:

1983-1989:

Studium der Informatik, Johannes Kepler Universität Linz.

Schwerpunkte:

-Operations Research und Simulation,

1989-1990:

-System- und Automatisierungstechnik.

Schwerpunkte:

Doktoratstudium der technischen Wissenschaften (Informatik), -Angewandte Informatik (Wirtschaft und Verwaltung).

-Automatisierungstechnik

Berufliche Tätigkeiten:

1985-1988:

VOEST ALPINE AG, Linz, Abt. Kryptographie und

Verschlüsselungssysteme,

Tutor am Institut für Allgemeine Informatik der Universität Linz.

1988-1989:

Firma BMW-Motoren-Ges.m.b.H., Steyr.

1989-1990:

Firma Chemserv Industrie Service Ges.m.b.H., Linz,

seit 10/1990:

Freier Mitarbeiter der Abt. Systemtechnik und Automatisierung, Uni Linz. Angestellter der Wissenschaftlichen Landesakademie für Niederösterreich,

. . . .

Abt. System- und Automatisierungstechnik, Krems;

Freiberufliche Tätigkeiten: Fa. VELOCE Fahradbotendienst GmbH, Wien;

seit 2/92:

Stv. Leiter der Abteilung System- und Automatisierungstechnik.

Referent auf internationalen und österreichischen Kongressen, Tagungen und Workshops mit den Schwerpunkten CIM, Informationssysteme,

Qualitätssicherung

Ab WS93/94:

Lektor an der Technischen Universität Wien, Fakultät Maschinenbau.

Einsatzgebiete:

Integrierte Informationssysteme und Expertensysteme in technischen und medizinischen Bereichen. Beratungstätigkeiten. Postgraduale Aus- und Weiterbildung.

DIPL.-ING. DR. TECHN. PETER KOPACEK

Ordentlicher Unviversitätsprofessor der Technischen Universität Wien, A-1040 Wien, Floragasse 7a. Geboren 1939 in Wien, 1971 Dr. techn. mit Auszeichnung, 1976 Habilitation, 1986 O. Univ. Prof. für "Systemtechnik und Automatisierung", Abt. Systemwissenschaften der Johannes Kepler Universität Linz, seit Okt. 1988 Wissenschaftlicher Leiter der Wissenschaftl. Landesakademie für NÖ in Krems, März 1990 O. Univ. Prof. für "Handhabungsgeräte und Robotertechnik" und Vorstand des gleichnamigen Instituts an der Technischen Universität Wien.

Autor oder Herausgeber mehrerer Bücher, über 100 wissenschaftliche Veröffentlichungen, ca. 90 Vorträge; IPC Vorsitzender und Organisator mehrerer IFAC-Symposien.

DIPL.-ING. DR. TECHN. ILIR D. ÇAUSHI

Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Handhabungsgeräte und Robotertechnik der Technischen Universität Wien, A-1040 Wien, Floragasse 7A/318.

1957 in Tirana (Albanien) geboren. 1976 Matura mit ausgezeichnetem Erfolg in Tirana.

1980-85 Maschinenbauestudium an der Technischen Universität Wien, beide Diplomprüfungen mit Auszeichnung bestanden. 1985 Diplomarbeit über Rotorschwingungen am Institut für Maschinendynamik und Meßtechnik.

1985-90 Universitätsassistent am Lehrstuhl für Mechanische Konstruktionen der Universität Tirana, Leiter der Lehrveranstaltungen "Maschinendynamik und -schwingungen" und "Probleme der Maschinendynamik". 1989 Promotion (Torsionsschwingungen in den Antriebssystemen von Schiffen). Diese Arbeit wurde auch von der Technische Universität Wien nostrifiziert.

1990-92 Dissertation an der TU Wien über das Thema "Dynamische Einflüsse von Massen- und Steifigkeitsreduktionen auf die Bewegungsgrößen starrer und elastischer Industrieroboter". Derzeit Arbeiten an Forschungsprojekten über neue Verfahren zur Konstruktion und Steuerung von Leichtbaurobotern.

MAG. RER. NAT., DR.PHIL. KURT DESOYER

Ordentlicher. Universitätsprofessor für Technische Mechanik an der Technischen Universität Wien, A-1040 Wien, Wiedner Hauptstraße 8-10, Institut für Mechanik.

Geb. 1924 in Wien, Studium 1945 bis 1951 T.H. und Univ. Graz und Wien, Dr. phil. (Physik, Math.) 1950 Univ. Wien. Lehramtsprüfung 1951. Ab 1951 Ass. am I. Inst. f. Mechanik T.H. Wien, 1958 Habilitation Mechanik. 1965 A.o.Prof., 1967 O. Prof. für Technische Mechanik, T.U. Wien, Fakultät für Maschinenbau. 1976/77 bis 1978/79 Dekan; 1959 Österr. Ehrenkreuz f. Wiss. und Kunst, 1983 Gr. Silb. Ehrenzeichen für Verdienste um die Republik Österreich.

Arbeits - und Publikationsgebiete: Luft- und Wasserlager, Schwingungstilgung, Grundwasserströmungen und Bodensetzungen, Baustatik, Tunnellüftung, Berührprobleme, Fahrzeugdynamik, Mehrkörperdynamik, Robotik.

Koautor der Bücher "Techn. Mechanik", Springer Verlag, Wien, 4. Auflage 1992, "Industrieroboter und Handhabungsgeräte", Oldenbourg 1985, "Mechanik auf dem Bildschirm". Springer Verlag, Wien 1988, und diverser Bände der Schriftenreihe Straßenforschung des ehemaligen Bundesministeriums für Bauten und Technik, Wien.

DIPL.-ING. DR. TECHN. ALEXANDER WEINMANN

Ordentlicher Universitätsprofessor der Technischen Universität Wien, A-1040 Wien, Gußhausstraße 27. Senior Member IEEE, Mitglied ÖVE, Mitglied ÖMG. Geboren 1937 in Wien, 1962 Dr. techn., 1966 Habilitation, 1968 O.Univ.Prof. für "Elektrische Regelungs- und Steuerungstechnik" und Vorstand des gleichnamigen Instituts, 1976-79 und 1991-1995 Dekan der Fakultät Elektrotechnik.

50 wissenschaftliche Veröffentlichungen in verschiedenen Fachzeitschriften, Autor mehrerer Bücher insbesonders "Regelungen, Analyse und technischer Entwurf" in mehreren Bänden und Auflagen sowie "Uncertain Models and Robust Control" im Springer Verlag, Wien New York, 35 Fachvorträg, 18 Patente, Konsulent der Elin Energieanwendungen Ges.m.b.H. seit 1962, wissenschaftliche Leitung der Elin-Zeitschrift seit 1972, Zivilingenieur für Elektrotechnik seit 1974, Vorstand im EDV-Zentrum der Technischen Universität Wien 1974 - 1990.

Erstmalige Ausschreibung des

Fred - Margulies - Preises für Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik mit besonderer Berücksichtigung der sozialen Aspekte

Anläßlich des zehnjährigen Bestehens des IFAC - Beirates Österreich verleiht dieser jährlich zusammen mit der Gewerkschaft der Privatangestellten den Fred - Margulies - Preis. Der Preis wird für hervorragende österreichische Arbeiten auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik mit besonderer Berücksichtigung der sozialen Aspekte bei ihrer Einführung in Betrieben verliehen. Kriterien für die Bewertung sind im wesentlichen Innovationsgehalt, Wissenschaftlichkeit, wirtschaftliche Bedeutung sowie Interdisziplinarität des Ansatzes und insbesondere soziale Relevanz. Der Preis in der Höhe von

ATS 60.000,-- pro Jahr

wird je zur Hälfte von den beiden Stiftern geleistet und wird von einer Jury vergeben, welcher neben Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Wirtschaft auch Vertreter der Gewerkschaft angehören. Der Fred - Margulies - Preis wird vom Leiter der Forschungssektion des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung im Rahmen des "Österreichischen Automatisierungstages" verliehen.

Eingereicht können Studien werden, welche innerhalb der letzten 5 Jahre in Österreich abgeschlossen wurden. Diese Arbeiten sind bis spätestens 1. Dezember jeden Jahres in Form einer Studie in dreifacher Ausfertigung sowie einer Kurzfassung (max. 10 Seiten) in 5facher Ausfertigung beim

Generalsekretariat des IFAC - Beirates, c/o Institut für Handhabungsgeräte- und Robotertechnik der Technischen Universität Wien, Floragasse 7a, A - 1040 Wien

einzureichen.

Für weitere Anfragen steht das Sekretariat des IFAC - Beirates unter obiger Adresse zur Verfügung.

Bericht:

2. Internationales Workshop

"Robotics in Alpe Adria Region"

13.-15. Juni 1993

Wissenschaftliche Landesakademie für Niederösterreich, Krems.

Die Working Group "Robotics" der Alpen Adria Initiative wurde vor zwei Jahren gegründet. Hauptzweck dieser Arbeitsgruppe ist es Probleme des Robotereinsatzes in den Regionen Alpe Adria zu diskutieren. Da es sich hier um überwiegend kleinere Wirtschaftsräume handelt, wird die Struktur der Industrie überwiegend durch Klein- und Mittelbetriebe geprägt. Erfahrungsgemäß haben diese kleinen und mittleren Unternehmen andere Anforderungen und Voraussetzungen an den Robotereinsatz als größere Firmen.

Spezifische Probleme dieser Art wurden auf diesem zweiten Workshop in Form von drei Übersichtsvorträgen, 50 Einzelvorträgen sowie einer Diskussionssitzung behandelt. Die Übersichtsvorträge behandelten die Roboterforschung in Österreich, die Einführung moderner Steuerungskonzepte, wie Fuzzy-Methoden oder neuronale Netze zur Robotersteuerung sowie die Einrichtung eines zentralen Roboterlabors für Mitgliedsregionen von Alpe Adria in Laibach. Der Bogen der Themen der Fachvorträge spannte sich naturgemäß von mehr theoretisch orientierten Arbeiten, überwiegend über Kinematik und Kinetik von Industrierobotern, sowie Steuerungsalgorithmen bis zu anwendungsorientierten Arbeiten, beispielsweise über die Entwicklung eines programmierbaren intelligenten Robotergreifers und die rechnergestützte Regelung von Montagezellen. Die Diskussionssitzung beschäftigte sich mit Projektmanagement im Zusammenhang mit EG-Projekten auf dem Gebiet der Robotik.

Die mehr als 70 Teilnehmer zeigten sich mit dem Verlauf und den fachlichen Ergebnissen dieses Workshops sehr zufrieden. Auffallend war auch, zum Unterschied von gleichartigen Fachsymposien, daß nur 9 Papers nicht gehalten wurden. Auf dem jährlichen Meeting der Working Group wurde beschlossen dieses Workshop abwechselnd in Slowenien und in Österreich abzuhalten. Das nächste Workshop findet daher Anfang Juli 1994 in Laibach statt.

Vorbericht

12. IFAC Weltkongreß

18. bis 23 Juli 1993,

Sydney, Australien

Aus Platzgründen kann in dieser Ausgabe nur ein Kurzbericht veröffentlicht werden. Ausführliche Berichte von österreichischen Teilnehmern folgen in der nächsten Ausgabe.

Seit dem ersten IFAC Weltkongreß im Jahre 1960 in Moskau, wo sich ungefähr 200 Regelungstechnikfachleute trafen, hat sich dieser in dreijährigem Abstand stattfindende Weltkongreß mehr zu einem gesellschaftlichen als wisssenschaftlichen Großereignis entwickelt. Kontinuierlich steigende Teilnehmerzahlen, sowie auch die Anzahl der Vorträge machen es für den Einzelnen fast unmöglich wenigstens nur die ihn interessierenden Präsentationen zu besuchen. Da sich unter den 1400 Teilnehmern aus 50 Staaten diesmal erfreulich viele (17) Österreicher befanden, konnte durch Koordination erreicht werden, daß von österreichischer Seite ein Maximum an Technical Sessions besucht werden konnte. Die Veranstalter akzeptierten diesmal überdurchschnittlich viele Arbeiten sodaß 12 Parallelsitzungen abgehalten werden mußten. Als Konferenzort wurde das Convention und Exhibition Center in Darlig Harbour gewählt, welches sicher zu einem der interessantesten Plätze Sydneys zählt. Auch das erste gesellschaftliche Ereignis, die Eröffnungsveranstaltung in der weltberühmten Sydney Oper trug zum Gelingen dieses Kongresses bei.

Die Vielzahl von Papers die für diese Veranstaltung angenommen wurden, erforderte 173 Technical Sessions und 10 Postersessions. Ergänzt wurde das Programm durch 5 Survey Papers sowie eine Panel Discussion. Die Survey Papers behandelten drei mehr theoretisch orientierte Themen ("Optimization Based Design and Control of Dynamic Systems", "The Process of Identification", "Recent Developments in Digital Control Theory") sowie zwei praxisorientierte Themen ("Control Configured Automobils in the 21st Century" und "Process Control: Theories and Profits"). Die Veranstalter versprachen sich von einer neuen Struktur bestehend aus Minisymposien, Target Areas, und Regular Sessions eine Effizienzsteigerung welche jedoch nicht zu bemerken war. Sie versuchten, die Vorträge thematisch so zu ordnen, daß sich die Besucher leichter orientieren konnten was aber nur in einigen Fällen gelang. Vorteilhaft erwies sich, daß sich die Session Chairmen und die Vortragenden streng an den vorgegebenen Zeitplan hielten - so wurde bei Ausfall eines Vortragenden eine Pause eingeschoben - um den Besucher einen Wechsel innerhalb der Sessions zu ermöglichen. Auf diese Art un Weise konnte sich jeder der Teilnehmer seinen individuellen Fahrplan zusammenstellen.

Als weitere Aktivität fand parallel zu dem Kongreß eine Ausstellung von Herstellern von Prozeßautomatisierungseinrichtungen sowie von Automatisierungssoftware statt.

Dieser erste IFAC-Kongreß in der südlichen Hemisphäre hatte eine Vorbereitungszeit von 10 Jahren. Die Organisatoren hatten weiters versucht die Teilnehmergebühr durch Einwerben von Sponsorgeldern möglichst niedrig zu halten. Die nächsten Wochen und Monate werden von jedem Teilnehmer dazu genützt werden, die gewonnenen Erkenntnisse weiter auszuwerten und im nächsten Hest dieser Zeitschrift aussührlich Bericht zu erstatten.

Kurzfassung der Dissertation "Zur kinematischen Steuerung von Robotern mit redundanten Freiheitsgraden"

von H. Allgeuer

Begutachter: Univ. Prof. Dr. I. Troch und Univ. Prof. Dr. K. Desoyer

Roboter, die mehr als die minimal notwendige Anzahl von Freiheitsgraden besitzen, die sie benötigen, um ihre Aufgabe zu erfüllen, bezeichnet man als Roboter mit redundanten Freiheitsgraden oder als redundante Roboter. Roboter dieser Art bieten Vorteile gegenüber konventionellen, da sie eine Stellung der Roboterhand durch unendlich viele Armstellungen einnehmen können, wodurch z.B. ungünstige Armstellungen vermieden werden können oder auch Hindernissen im Arbeitsraum ausgewichen werden kann. Zur kinematischen Steuerung wird aber ein Algorithmus benötigt, der zu jedem Zeitpunkt aus der unendlich groPen Anzahl der Gelenksstellungen zu einer Handstellung eine passende auswählt. In dieser Arbeit wird untersucht, auf welche Art man solche Algorithmen zur Redundanzauflösung erhält, die für praktische Anwendungen verwendbar sind. Zuerst werden die für redundante Roboter relevanten mathematischen Grundlagen erarbeitet. Dann werden die verschiedenen Methoden zur Redundanzauflösung an Hand von theoretischen Überlegungen und Simulationen untersucht, und ihre Eigenschaften mit denen verglichen, die wir von einem praktisch einsetzbaren Algorithmus fordern. Dabei beschränkt sich die Untersuchung auf Algorithmen, die zur Berechnung der momentanen Bewegung der Gelenke nur Informationen über die momentane Handbewegung verwenden. Es stellt sich heraus, daß Resolved Motion Rate Control-Algorithmen (Algorithmen, die auf Umkehrung der Beziehung zwischen den Gelenksgeschwindigkeiten und der Geschwindigkeit der Roboterhand beruhen), die die Eigenschaft der Wiederholbarkeit haben, am besten geeignet sind. Unter Wiederholbarkeit versteht man, daP wenn die Roboterhand nach Ausführung einer beliebigen Bewegung wieder in die Ausgangsstellung zurückkehrt, auch die Gelenke des Roboterarms wieder die gleiche Stellung einnehmen wie zu Beginn der Bewegung. Weiters werden ein neues Kriterium für die Wiederholbarkeit und die Bedingung zweiter Ordnung für das Maximum bzw. Minimum einer Funktion der Gelenksstellungen bei fixierter Position der Roboterhand hergeleitet. Die Relevanz der untersuchten Algorithmen für die Praxis wird durch Simulationen bestimmt. In weiterer Folge werden drei Beispiele für wiederholbare Algorithmen ausgearbeitet. Es sind dies Algorithmen zur Steuerung eines ebenen 4R-Roboters, eines redundanten PUMA-Roboters und eines ebenen 3R-Roboters, der sich in einem Arbeitsraum mit einem Hindernis bewegt. SchliePlich wird ein nicht-wiederholbarer Algorithmus für ein redundantes Roboterhandgelenk entwickelt, der es ermöglicht, Bewegungen im gesamten Arbeitsraum auszuführen. Die Anwendbarkeit dieser Algorithmen für die Praxis wird durch zahlreiche Simulationen nachgewiesen.

Kurzfassung der Dissertation

"Möglichkeiten des Einsatzes Wissensbasierter Systeme bei der Erstellung und Simulation von Weltmodellen"

von A. Frotschnig

Begutachter: Univ. Prof. Dr. P. Kopacek und Univ. Prof. Dr. P. Fleissner

Die Arbeitsgruppe Supplementary Ways for Improving International Stability (SWIIS) übte einen wesentlichen Einfluß im Entstehen dieser Arbeit aus. Diese in den späten 70er Jahren in der IFAC (International Federation of Automatic Control) gegründete Arbeitsgruppe setzt sich mit der Anwendung systemtechnischer Probleme der Konfliktforschung auseinander: Es wird der Ansatz verfolgt, mathematische Modelle auf Basis von PC-Programmen zu erstellen und anzuwenden. Weltmodelle finden dabei besondere Beachtung.

Computerunterstützte Methoden wurden vielfach zur Untersuchung der globalen problématique (Club of Rome) eingesetzt. In diesem Zusammenhang führten die Erstellung und Simulation von Weltmodellen zu einer Weiterentwicklung und Anerkennung der Methoden - i.e. Simulationen mathematischer Modelle angewandt auf sozio-ökonomische und politische Fragestellungen. Für weitere Forschungstätigkeiten auf diesem Gebiet gibt es jedoch eine Fülle von interessanten und wichtigen Fragestellungen. Einen Ansatz stellt die Entwicklung von Methoden der Artificial Intelligence (z.B. wissensbasierte Techniken) im Einsatz bei Weltmodellen dar.

Die Bereiche Artificial Intelligence und Simulation bieten bezüglich der Anwendbarkeit eine ganze Palette von möglichen Aktivitäten: sie reichen von der Entwicklung eines Simulationsmodells, über den experimentellen Entwurf zur Planung der Parameter-Darstellungen für die Simulationsläufe, die Analyse der Outputs der Simulation, bis hin zur Modifikation des Simulationsmodells. Den theoretischen Hintergrund für die Unterstützung in der Entwicklung und Anwendung bei Simulationen bildet der Einsatz von Expertensystem-Technologien.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz wissensbasierter Systeme bei Simulationsmodellen. Weltmodelle sind Computerprogramme, die dazu verwendet werden können, Prozesse oder Vorgänge zu studieren, die sich staatliche Grenzen überschreitend auswirken und deren Fachgrenzen sich überschneiden. Beispiele solcher Prozesse sind der Technologietransfer, ökonomische Entwicklung, Rüstungsdynamik, Bevölkerungsdynamik, die Umweltproblematik oder die "Nord-Süd"-Thematik. Ein Weltmodell besteht aus einem mathematischen Gleichungssystem, das numerisch gelöst werden kann. Das Verhalten der Lösung, die eine Simulation zukünstiger Entwicklungen darstellt und mittels Computer berechnet wird, gibt Aufschluß über die zu erwartende Entwicklung.

In dieser Arbeit wird zusätzlich zu den bekannten Ansätzen versucht, wissensbasierte Methoden zu verwenden. Es wird daher zunächst eine Übersicht über bekannte Weltmodelle gegeben. Das erfolgt in einer Beschreibung bestehender Weltmodelle, mit besonderer Berücksichtigung, daß diese auf PCs implementierbar und lauffähig sind.

Mit der Methode System Dynamics, die bei vielen Weltmodellen zum Einsatz kommt, kann verbales Wissen in graphische Diagramme - Kausaldiagramme - konvertiert werden. Die große Stärke dieser Methode besteht darin, einen wesentlichen Beitrag auf dem Weg zu einem qualitativen Modell zu liefern. Da dabei die Informationen in den Objekten und deren Beziehungen untereinander stecken, bildet diese Darstellungsform eine optimale Voraussetzung zu einer Wissensrepräsentation in einem semantischen Netzwerk oder mit Frames. Solche Frames können dann mit den Prinzipien der Vererbung usw. ihre Bedeutung als Zustandsgrößen, Raten oder Parameter bzw. definierte Variablen erhalten. Auf diese Weise können komplexe dynamische Strukturen repräsentiert werden.

Ein weiterer theoretischer Teil dieser Arbeit gibt eine Einführung in die wissensbasierten Systeme. Hier werden die wichtigsten Grundlagen, soweit sie für den Inhalt der Arbeit erforderlich sind, erläutert. Wissensbasierte Systeme beschäftigen sich mit der Verarbeitung

von Wissen und sind in der Lage, aus bekannten Fakten und Regeln Schlußfolgerungen zur Ableitung neuer Zusammenhänge zu ziehen. Zu den wichtigsten Merkmalen wissensbasierter Systeme zählen die Trennung zwischen dem eigentlichen Wissen und den Ableitungsmechanismen, die Verarbeitung von diffusem, unvollständigem Wissen sowie die Erklärungsfähigkeit des Lösungsprozesses.

Die Anwendung von wissensbasierten Systemen in der Simulation wird ausführlich diskutiert, wobei auf verschiedene Kooperationsmöglichkeiten von wissensbasierten Systemen und Simulationsmodellen eingegangen wird. Es werden aus der Literatur bekannte Anwendungen vorgestellt und die Problematik des Einsatzes bei Weltmodellen diskutiert.

Im anwendungsorientierten Teil der Arbeit wird ein wissensbasiertes System für das Weltmodell GLOBUS entwickelt wird. GLOBUS wurde im Internationalen Institut für Vergleichende Gesellschaftsforschung am Wissenschaftszentrum Berlin erstellt. In einer Vorstudie wurden zunächst verschiedene Möglichkeiten des Einsatzes eines wissensbasierten Systems auf das verwendete Simulationsmodell GLOBUS untersucht. Diese Überlegungen orientierten sich theoretischen an Untersuchungen über methodologische Kopplungsmöglichkeiten von Simulationsmodellen und Expertensystemen. Ausgangspunkt war das sowohl theorie- als auch anwendungsbezogene Ziel, Wege aufzuzeigen, wie eine wissensbasierte Komponente und ein bereits bestehendes numerisches Simulationsmodell zweckmäßig integriert werden können.

Es werden daraufhin ein prototypisches wissensbasiertes System entwickelt und eine Beispielkonsultation durchgeführt. Die wichtigsten Programmpunkte des prototypischen Systems sind (a) die graphische Wiedergabe des zeitlichen Verlaufs der darstellbaren Größen, (b) die Erklärung der Zusammenhänge der Variablen und Parameter und (c) der Vergleich eines Szenarios mit dem Referenzlauf.

Um die Ergebnisse eines komplexen Simulationsmodells verständlich und anschaulich darzustellen, wurde ein prototypisches wissensbasiertes System als "Intelligent Front-End"-Konzept entwickelt. Dieses System hat die Aufgabe, neben der quantitativen Darstellung der Ergebnisdatenmenge ("Wie-Fragen") auch sogenannte "Warum-Fragen" zu beantworten. Diese Antworten sollen implizite Zusammenhänge aufzeigen, die bei komplexen Modellen nicht mehr überblickbar sind.

Das System selbst wurde in C++ entwickelt und ermöglicht dem Benutzer die kausalen Einflüsse auf die Variablen einerseits qualitativ zu betrachten, indem ein gewichteter Baum für die vom Benutzer gewählten und interessierenden Größen entwickelt und graphisch dargestellt wird. Weiters werden die quantitativen Einflüsse mittels einer vereinfachten Sensitivitätsanalyse berechnet und ebenfalls in die Baumstruktur miteingebunden. Auf diese Weise können komplexe, vom Benutzer in der Gesamtheit nicht mehr überblickbare Zusammenhänge, die zudem implizit im Simulationsmodell abgebildet sind, qualitativ und quantitativ dargestellt werden.

Aufgrund der Tatsache, daß das verwendete Simulationsmodell bereits vorhanden war, hatte sich die Wissensakquisition zunächst darauf beschränken, eine geeignete Darstellungsform für das im Modell implizit vorhandene Wissen zu finden. Das Wissen mußte folglich *mur noch* aus dem Simulationsmodell und der begleitenden Dokumentation "extrahiert" und in der Wissensbasis abgelegt werden.

Mit dem verwendeten Ansatz und den implementierten Methoden gewinnt das entwickelte System eine enorme Bedeutung bezüglich der Anwendbarkeit auf Simulationsmodelle, und nicht nur auf jene, die mit dem System Dynamics-Ansatz erstellt wurden. Die Zustands-(Differential- oder Differenzengleichungssysteme erster Ordnung) und Ausgangsgleichungen stellen die Systemgleichungen der Modelle dar. Sie beinhalten die vom wissensbasierten System benötigten Informationen und können für jedes derartig formulierte Modell mit der hier entwickelten Methode interpretiert werden. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methode kann demnach nicht nur für Weltmodelle nutzbar gemacht werden, sondern allgemein für jegliche dynamische Systeme, ob sie linear oder nichtlinear, kontinuierlich oder diskret, deterministisch oder stochastisch sind. Damit kann ein weites Anwendungsfeld für Simulationsmodelle gesehen werden.

Kurzfassung der Dissertation "A Model of Direct Drive Axes to Improve Robot Accuracy"

von M. Vincze

Begutachter: Univ. Prof. G. Zeichen und Univ. Prof. Dr. R. Patzelt

Off-line programming promises to reduce robot down time due to teach programming to virtually zero. But first applications show that today's robots are not suitable for off-line programming. The accuracy with which a robot is positioned at the off-line programmed pose is several magnitudes worse than the robot's repeatability. One approach to solve this problem is robot calibration.

The aim of the dissertation is to introduce a systematic model that allows to describe any possible type of robot or series of axes with a non redundant model. The developed direct-drive (DD) model bases on the three possible configurations (single axis, orthogonal and parallel) between two adjacent joint axes. For each case a geometric model with a minimum number of parameters is defined, which ensures that the overall model contains no redundancies or singularities. It is then shown that the basic geometric model can be easily expanded to include such effects as tumbling, link deflection, encoder errors or temperature changes.

The model is used to calibrate a 6 DOF direct-drive robot. This robot exhibits a repeatability of 5 micrometers. A calibration improved accuracy from 3 to 0.15 millimeter. Further improvements are likely but the presently available robot measurement systems do not provide sufficient accuracy. With a laser tracking system developed at the institute accuracy measurements in the range of the robots repeatability will be possible soon.

The advantage of the DD-model is its generic use and the assurance of a redundancy free model, which easies the parameter identification process. With this model it is also possible to describe factors such as backlash or transmission errors, which deteriorate the accuracy of conventional gear driven robots. The properties and the application of the model remain unchanged.

VERANSTALTUNG	ZEITPUNKT	ORT	WEITERE INFROMATIONEN ERHÄLTLICH BEI
Hochschulkurs Qualitätssicherungsystem und Qualitätstechniken	22. September - 1. Oktober 1993	Wien, Österreich	Prof. J. Zemann Fr. E. Altermann Außeninstitut der TU Wien Gußhausstraße 28 A-1040 Wien Telefon: 0222/58801-4019 Fax: 0222/505 49 61
Hochschullehrgang Sicherheitstechnik	Studienjahr 1993/94 Beginn: Herbst 1993		Prof. P. Kopacek Frl. A. Weichselbaum Abt. System- u. Automatisierungs-technik, Wissenschaftl. Landes- akademie für Niederösterreich A-3504 Krems-Stein Telefon: 02732/705 45-112 Fax: 02732/76 761
VIET Internationale Fachmesse für Elektrotechnik und Industrielle Elektronik	28. September - 1. Oktober 1993	Wien, Österreich	Arbeitsgemeinschaft für Fachausstellungen GES.M.B.H. Mariahilfer Straße 2 A-1070 Wien Telefon: 0222/93 85 17-0 Fax: 0222/526 75 53
9. Österreichischer Automatisierungstag "Automatisierungstechnik 2001"	30. September 1993	Wien, Österreich	Univ. Prof. Dr. P. Kopacek Floragasse 7a A-1040 Wien Telefon: 0222/504 18 35 Fax: 0222/504 18 359
Informationstagung Mikroelektronik 1993	2930. Sept. 1993	Wien, Messezentr. Prater	DiplIng. G. Fiedler Gußhausstraße 25 A-1040 Wien Telefon: 0222/58 801 - 3582 Fax: 0222/587 59 98
Hochschullehrgang Automatisierungstechnik I	Studienjahr 1993/94 Beginn: 24. 9. 1993	••	Prof. P. Kopacek Frl. A. Weichselbaum Abt. System- u. Automatisierungs-technik, Wissenschaftl. Landes- akademie für Niederösterreich A-3504 Krems-Stein Telefon: 02732/705 45-112 Fax: 02732/76 761

Doz. H. Strelec Wien. Hochschulkurs 27. Oktober -24. November 1993 Österreich Fr. E. Altermann Technische Statistik Außeninstitut der TU Wien Gußhausstraße 28 A-1040 Wien Telefon: 0222/58801-4019 Fax: 0222/505 49 61 Arbeitsgruppe CAD Hochschulkurs 28. Oktober 1993 Wien, Fr. E. Altermann Österreich Moderner rechnerunterstützter Entwurf Außeninstitut der TU Wien Gußhausstraße 28 elektronischer Systeme A-1040 Wien Probleme-Methoden-Telefon: 0222/58801-4019 Lösungen Fax: 0222/505 49 61 Prof. P. Kopacek Hochschullehrgang Studienjahr 1993/94 Krems, Frl. A. Weichselbaum Beginn: 8, 10, 1993 Österreich Automatisierungstechnik II Abt. System- u. Automatisierungs-technik, Wissenschaftl. Landesakademie für Niederösterreich A-3504 Krems-Stein Telefon: 02732/705 45-112 Fax: 02732/76 761 Prof. P. Kopacek Internationaler Hochschulkurs 8. November -Krems. Frl. A. Weichselbaum Österreich im Rahmen von COMETT II 19. November 1993 Abt. System- u. Geräte der Automatisierungs-Automatisierungs-technik, technik sowie ihre Installation Wissenschaftl, Landesakademie für Niederösterreich A-3504 Krems-Stein Telefon: 02732/705 45-112 Fax: 02732/76 761 25. November 1993 Prof. P. Kopacek Krems. Technische Anwendung von Österreich Frl. A. Weichselbaum Fuzzy Methoden und Abt. System- u. Neuronalen Netzen Automatisierungs-technik, Wissenschaftl Landesakademie für Niederösterreich A-3504 Krems-Stein Telefon: 02732/705 45-112 Fax: 02732/76 761

Internationaler Hochschulkurs Ende 1993 im Rahmen von COMÈTT II Precision Engineering und Qualitätsmanagement in der Mikro- und Nano-Technologie

Wien, Doz. P. H. Osanna Österreich Fr. E. Altermann

Außeninstitut der TU-Wien

Gußhausstraße 28 A-1040 Wien

Telefon: 0222/58801-4019 Fax: 0222/505 49 61

Hochschullehrgang Automatisierungstechnik III Studienjahr 1993/94 Krems, Beginn: 26. 11. 1993 Österreich Prof. P. Kopacek Frl. A. Weichselbaum Abt. System- u.

Automatisierungs-technik, Wissenschaftl. Landes-

akademie für Niederösterreich A-3504 Krems-Stein

Telefon: 02732/705 45-112

Fax: 02732/76 761

Hochschulkurs
Finite ElementeBerechnungen:
Problemaufbereitung und
Modellbildung

Frühjahr 1994

Wien, P Österreich F

Prof. F. Rammerstorfer Fr. E. Altermann

Außeninstitut der TU Wien

Gußhausstraße 28 A-1040 Wien

Telefon: 0222/58801-4019 Fax: 0222/505 49 61

Hochschulkursreihe Sensorik Frühjahr 1994

Wien, Österreich Prof. R. Chabicovsky Fr. E. Altermann

Außeninstitut der TU Wien

Gußhausstraße 28 A-1040 Wien

Telefon: 0222/58801-4019

Fax: 0222/505 49 61