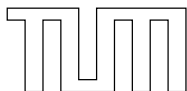


B E R I C H T 1982 – 2001

Friedrich Pfeiffer



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	1
2	Lehre	4
2.1	Zahlen und Fakten	4
2.2	Übersicht der Lehrveranstaltungen	7
2.3	Vorlesungen zum Vordiplom	8
2.4	Vorlesungen zum Hauptdiplom	9
2.5	Weitere Lehrveranstaltungen	17
3	Forschung	20
3.1	Überblick	20
3.2	Forschung im Lichte der Promotionen und Habilitationen	29
3.2.1	Grundlagen	29
3.2.2	Anwendungsforschung für Maschinen und Antriebe	42
3.2.3	Maschinen, Geräte und Transport	53
3.2.4	Robotik und Laufen	56
3.3	Forschungsfinanzierung	72

4	Messen und Ausstellungen	74
4.1	Maschinen	74
4.2	Laufroboter	81
5	Internationale Kollegen und Doktoranden	90
6	Einige ausgewählte Veröffentlichungen	93
7	Dissertationen, Habilitationen	99
8	CV Pfeiffer	108

1 Vorwort

Der Übergang in den Ruhestand im Jahre 2001 nach 19 Jahren Arbeit an der Technischen Universität München zusammen mit einem runden Geburtstag im Jahre 2005 geben Anlass, eine Bilanz oder vielleicht eine Art Rechenschaftsbericht abzugeben. Seit 1982 sind in den Lehrstuhl B für Mechanik, der inzwischen in Lehrstuhl für Angewandte Mechanik umbenannt wurde, nicht unerhebliche Mittel seitens der TU-München und besonders seitens vieler Drittmittelgeber, allen voran der Deutschen Forschungsgemeinschaft, geflossen. Die vorliegende Broschüre will zeigen, was damit gemacht wurde.

Nach 19 Jahren arbeiten am Lehrstuhl die vierte und fünfte Generation von Assistenten und Doktoranden. Über 80 Dissertationen und Habilitationen sind entstanden, und alle Mitarbeiter haben sich ohne Ausnahme vom Stil und von der Atmosphäre des Lehrstuhls motivieren und vorantreiben lassen. Die Qualität eines Lehrstuhls, wie natürlich jeder anderen Organisationseinheit auch, steht und fällt mit der Qualität der Mitarbeiter. Sie müssen wissen, wo sie sind und was sie tun, und wie sie das einzuschätzen haben. Sie müssen auch wissen, was ihre Vorgänger getan haben, um von vornherein jegliche Neigung auszuschalten, vorhandene Räder noch einmal neu zu erfinden.

Der Lehrstuhl B für Mechanik ist einer von zwei Mechaniklehrstühlen innerhalb der Fakultät für Maschinenwesen an der Technischen Universität München. Schwerpunkt in Forschung und Lehre ist die Dynamik und Regelung mechanischer Systeme. Dies beinhaltet nicht nur Mechanik im klassischen Sinne, sondern auch Regelung, Optimierung und Informationsverarbeitung. Informationsverarbeitende und -gesteuerte Maschinenbausysteme liegen im Trend der Zeit. Inzwischen verlangen viele Aufgabenstellungen eine verstärkte interdisziplinäre Anwendung der oben genannten Fachgebiete. Elektronik, Sensorik, Meßtechnik und Elektronische Datenverarbeitung sind wachsende Bestandteile eines Dynamiklabors, theoretische Entwicklungen sind vielfach ohne massiven Rechneinsatz nicht möglich. Gerade deshalb muß den hinter allen noch so komplizierten Problemen steckenden physikalischen und grundlegenden Gesetzmäßigkeiten verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Ingenieurarbeit lebt vom Verständnis und von der günstigsten Umsetzung der hinter der Technik stehenden Probleme, Rechner und Meßtechnik sind dabei wertvolle Hilfsmittel, aber eben nur Hilfsmittel.

Die Ausrichtung des Lehrstuhls folgt einigen grundsätzlichen Regeln, die ich für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für wichtig halte und die einem Teil meiner

Industrieerfahrung entsprechen.

- Der Anspruch und das Niveau in Forschung und Lehre müssen internationalen Vergleichen standhalten.
- Theorie muß durch Versuche verifiziert werden. Versuche haben stets deutliche Rückwirkungen auf die Theorie. Daher ist ein modernes, funktionsfähiges Dynamiklabor zwingend. Ein Verhältnis 1:1 für Theorie : Versuch erscheint sinnvoll. Notwendig werdende Großversuche erfordern die Zusammenarbeit mit der Industrie.
- Sämtliche Arbeiten müssen einem einheitlichen Konzept folgen und einen Beitrag zum weiteren Ausbau der wissenschaftlich / handwerklichen Substanz liefern. Im vorliegenden Falle liegt die Substanz in der Dynamik mechanischer Systeme, insbesondere nichtlinearer und nichtglatter Systeme, unter Einschluß von Regelung, Sensorik, Meßtechnik, Informationsverarbeitung und Optimierung.
- Die Probleme der Arbeiten müssen innerhalb des nationalen und internationalen Forschungsgeschehens richtig und erfolversprechend plaziert sein. Vor dem Hintergrund der Lehrstuhlsubstanz müssen die langfristigen Risiken abschätzbar bleiben. Ohne diese grundsätzliche Führung von Mitarbeitern und Doktoranden leidet die Effizienz auch an einem Hochschulinstitut.
- Erfolgversprechendes Arbeiten erfordert Zusammenarbeit und eine überkritische Größe der beteiligten Gruppen. "*Communication is the name of the game*" gilt auch im Hochschulbereich. Es macht keinen Sinn, wenn Einzeltäger das Rad neu erfinden, ohne sich das Wissen ihrer Kollegen nutzbar zu machen. Darüber hinaus stellt Kommunikation eine unverzichtbare Voraussetzung für Kontinuität der Forschung und Lehre am Lehrstuhl dar.
- Die Forschungsschwerpunkte müssen ein vernünftiges Verhältnis von Grundlagen und Anwendungen aufweisen. Grundlagen, um Methoden und Verfahren weiterzuentwickeln, die ingenieurwissenschaftlicher Umsetzung dienlich sind, Anwendungen, um neu entwickelte Verfahren einem Härte-test zu unterziehen, aber auch um Hinweise auf Lücken in vorhandenen Grundlagen zu bekommen. Diese Wechselwirkungen sind unverzichtbar.
- Forschung und Lehre müssen eng verzahnt sein. Neue Forschungsergebnisse diffundieren von den Wahlfächern in die Pflichtfächer nach dem Vordiplom und von dort schließlich in die Grundvorlesungen vor dem Vordiplom. Dies erfordert ständige Anpassung. Vorlesungen müssen leben.

Diese Liste ließe sich verlängern. Ihre Realisierung hängt entscheidend vom "Klima" am Lehrstuhl ab. Motivation und Erfolge stellen sich niemals von alleine ein, sie müssen gesteuert werden. Voraussetzung sind gute Mitarbeiter.

Eine solche Bilanz gibt Anlass, allen zu danken, die direkt oder indirekt am Geschehen des Lehrstuhls beteiligt waren: Dem Land Bayern und der TU-München für die Bereitstellung von Infrastruktur, Personal, Flächen und Ausstattung, nicht zuletzt für die Erstellung eines einmaligen Fakultätsgebäudes in Garching. Den vielen Drittmittelgebern für großzügige finanzielle Unterstützung, der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Volkswagenstiftung, der Forschungsvereinigung für Verbrennungskraftmaschinen (FVV), der Körberstiftung und einer Reihe von Industriefirmen.

Mein Dank gilt in besonderem Maße den vielen wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Mitarbeitern, die den Lehrstuhl vorangebracht haben. Den Damen im Sekretariat, Frau Blöchl, Frau Schneider und davor Frau Becker, Frau Tänzel, sei für ihren Einsatz in den manchmal sehr stürmischen Perioden gedankt. Ohne die großartigen Kenntnisse von Dipl.-Ing. (FH) Georg Mayr wären unsere aufwendigen Elektronikkonzepte nie realisiert worden. Dafür ein herzlicher Dank. Und schließlich hat unsere Werkstatt mit den beiden Meistern Kriese und Miller sowie den Mitarbeitern Kruppa und Wöss immer zuverlässig dafür gesorgt, dass unsere oft sehr komplizierten Projekte auch in Hardware umgesetzt wurden, im übrigen die ganzen Jahre immer ohne größere Fehler. Die höchst erfolgreiche Realisierung all unserer Forschungen lag in ihren Händen. Auch dafür herzlichen Dank. Schließlich verdanke ich den vielen Doktoranden und Studenten, dass die langfristigen Forschungskonzepte in hervorragender Weise Wirklichkeit wurden. Ich habe von allen sehr viel gelernt.

Schließlich möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Thomas Geier für die intensive Hilfe bei der redaktionellen Bearbeitung, beim Einbau der Bilder und bei der Gestaltung des äußeren Erscheinungsbildes dieser Broschüre herzlich bedanken. Meinem Nachfolger, Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Heinz Ulbrich danke ich für die dazu notwendigen Freiräume.

Garching, im Februar 2005

Friedrich Pfeiffer

2 Lehre

2.1 Zahlen und Fakten

In den 19 Jahren von 1982-2001 änderte sich die Zahl der Studenten in der Fakultät für Maschinenwesen besonders stark. In den 80er Jahren hatte die Fakultät stets um die 900 Studenten im Erstsemester, die Gesamtzahl der Studenten pendelte zwischen 3.500 und 4.000. Zu Beginn der 90er Jahre fielen die Studienanfängerzahlen abrupt ab und erreichten ein Minimum in den Jahren 1993/94, in denen nur 260 Maschinenbaustudenten im ersten Semester vorhanden waren. Dieser Einbruch, der im übrigen in der gesamten Bundesrepublik zu beobachten war, hatte seine Gründe insbesondere in der schlechten industriellen Situation, in der latenten Technikfeindlichkeit in Deutschland und in einer meist schlechten und kurzfristig angelegten Berufsberatung der Schüler. Durch Arbeit an den Gymnasien und an den Schulen konnte die Situation verbessert werden, so daß die Anfängerzahlen bis zum Jahre 2001 wieder auf 719 anstiegen. Im Jahre 2004 waren es 893.

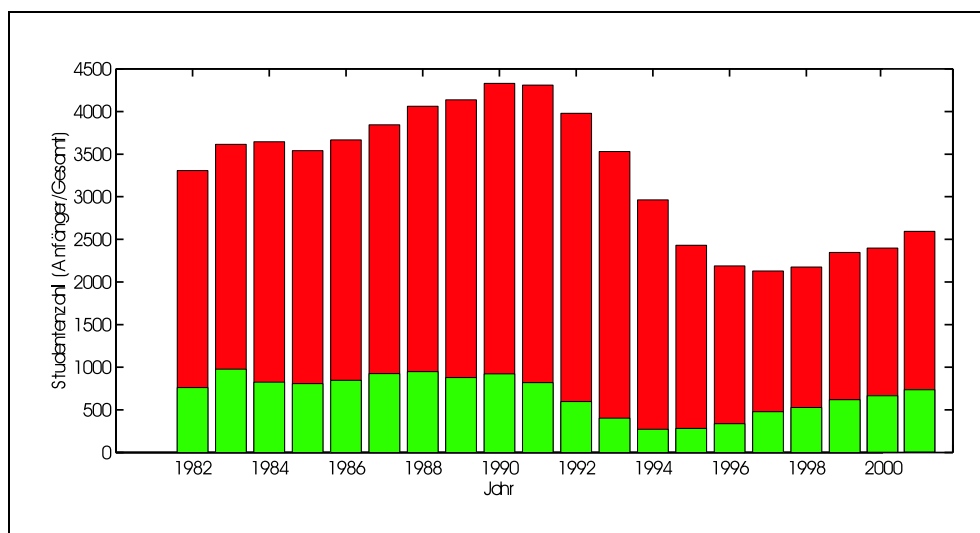


Abbildung 1: Studentenzahlen der Fakultät für Maschinenwesen

Dieser Entwicklung entsprechend fielen am Lehrstuhl B für Mechanik, besonders in der Grundvorlesung Technische Mechanik I-IV und in der Klausurvorlesung Technische Mechanik VI sehr viele Prüfungen an. Die Prüfungen werden schriftlich abgehalten und finden im Frühjahr und im Herbst statt. Ein Zwei-Jahres-

Rythmus ist wegen des Wechsels der Vorlesungen zwischen den Lehrstühlen A und B deutlich erkennbar. Insgesamt wurden bis Ende 2001 in diesem Bereich etwa 19000 Kandidaten vom Lehrstuhl B für Mechanik geprüft. Naturgemäß war die Teilnahme an Prüfungen in allen Wahlvorlesungen erheblich geringer, mit Ausnahme der Technischen Dynamik, die von Herrn Prof. Bremer und seit 1997 von Herrn Dr. Glocker als Dienstleistung für die Elektrotechnik gelesen wird.

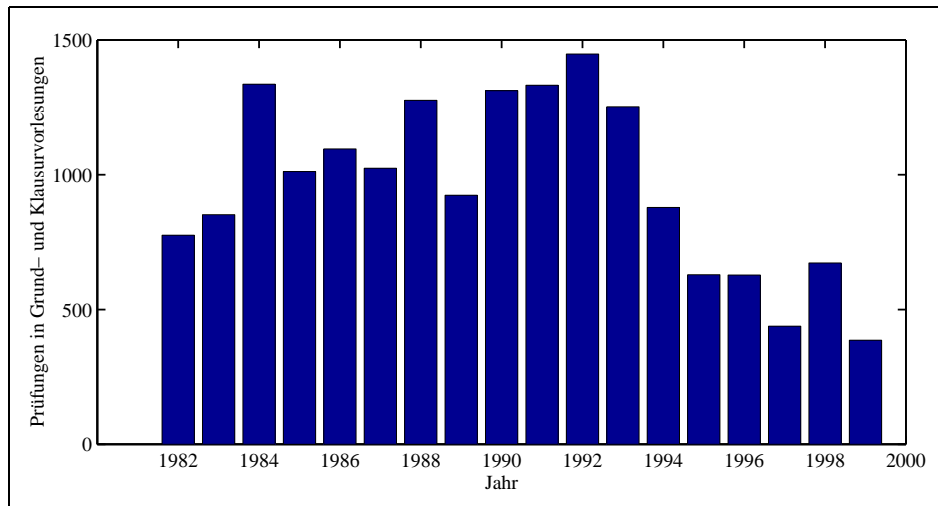


Abbildung 2: Prüfungen am Lehrstuhl B für Mechanik: Grund- und Klausurvorlesungen

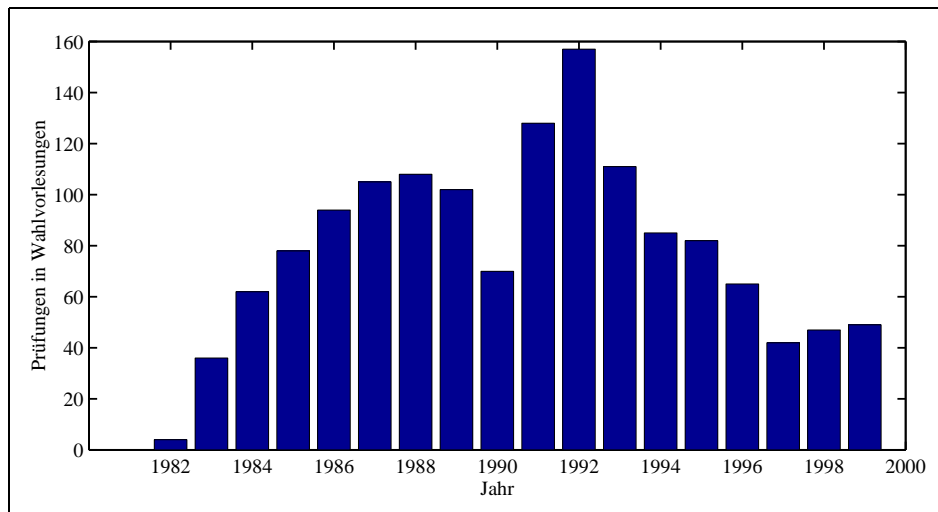


Abbildung 3: Prüfungen am Lehrstuhl B für Mechanik: Wahlvorlesungen

Die Abwicklung dreier Praktika entspricht der Studentenentwicklung. Zwei Praktika werden am Lehrstuhl selbst abgehalten, ein Rechnerpraktikum für Simulationstechnik führte der Lehrbeauftragte Prof. Kortüm bei der DLR in Oberpfaffenhofen durch. Insgesamt nahmen in den 19 Jahren von 1982 bis 2001 etwa 750 Studenten an den Praktika teil.

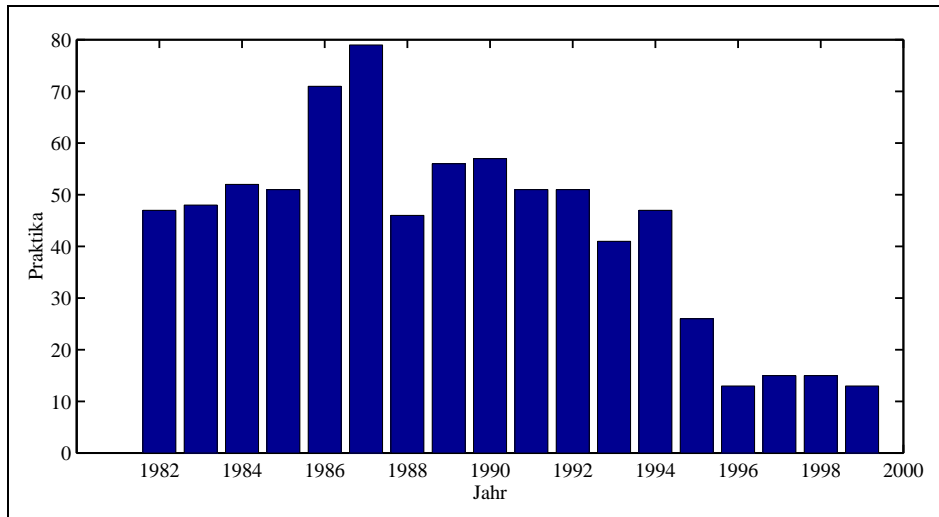


Abbildung 4: Besuch der Praktika am Lehrstuhl B für Mechanik

Die Zahl der Semester- und Diplomarbeiten ist an einem Grundlagenlehrstuhl meist geringer als an Anwendungslehrstühlen. Trotz dieser Tatsache hat es nie Probleme gegeben, aus den Diplomanden die Assistenten zu rekrutieren, die fast immer zu den 2 - 3% Besten ihres Jahrgangs gehörten.

2.2 Übersicht der Lehrveranstaltungen

V o r d i p l o m	Technische Mechanik I		WS
	Technische Mechanik II		SS
	Technische Mechanik III		WS

H a u p t d i p l o m	Mechanik für Mechatronik (E-Techniker)	WS	Mechanik-Kolloquium des Instituts für Mechanik	SS,WS
	Mechanik Kernfach Technische Mechanik VI	WS		
	Höhere Mechanik A (Roboterdynamik) (P,W)	SS	Seminar über Fragen der Mechanik	SS,WS
	Höhere Mechanik B (Schwingungsmodelle) (P,W)	SS	Seminar für Diplomanden und Semesteranden	SS,WS
	Nicht-glatte dynamische Systeme (W)	SS	Seminar für Software-Eng. und Prozeßdatenverarbeitung	SS,WS
	Schwingungsmessung (W)	WS		
	Dynamik & Regelung von Mechanismen (W)	SS	Mechanikpraktikum für Fortgeschrittene	WS
	Strukturdynamik (W)	WS	Praktikum für Schwingungsmessung	SS
	Simulation mechatronischer Systeme (W)	WS	Rechnerpraktikum für Simulationstechnik	SS
	Modul "Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen"			

Anleitung zu selbständigen wissenschaftlichen Arbeiten
--

(P: Pflicht-, W: Wahl-, K: Klausurfach)

2.3 Vorlesungen zum Vordiplom

(WS: Winter-, SS: Sommersemester)

(V: Vorlesung, Ü: Übung, T: Tutorübung)

Technische Mechanik I (Stereo-Statik)

F. Pfeiffer

WS / 3 V + 2 Ü + 1 T

Kraft, Kräftesysteme und Gleichgewicht, Arbeitsprinzip, Gleichgewichtsbedingungen, Einteilung von Kräften, Gewicht, Schwerpunkt und Massenmittelpunkt, Lagerung von Körpern und Lagerreaktionen, Allgemeine Eigenschaften von Lagerungen, Lagerstatik in der Ebene, Innere Kräfte und Momente am Balken, Sonderfall paralleler Kräfte, Verwendung des Seilecks in der Balkenstatik, Fachwerke, Seilstatik, Prinzip der virtuellen Arbeit, Reibungskräfte, Reibungserscheinungen und Reibungsgesetze.

Technische Mechanik II (Elasto-Statik, Kinematik)

F. Pfeiffer

SS / 3 V + 2 Ü + 1 T

Spannungen und Dehnungen, Spannungszustand, Verformungszustand, Zusammenhang zwischen Spannungs- und Verformungszustand, Zug und Druck, Torsion von Wellen mit Kreisquerschnitt und von dünnen Querschnitten, Technische Biegelehre, Quadratische Flächenmomente, Spannungsverteilung im Balken, Biegelinie, Einfluß der Schubspannungen, Überlagerung einfacher Belastungsfälle, Exzentrisch belasteter Zug- oder Druckstab, Festigkeitshypothesen, Energiemethoden, Sätze von Maxwell, Castigliano und Menabrea, Formänderungsenergie, Knickung, Knickgleichung und ihre Lösung, Eulersche Knickfälle, Membrantheorie der Schalen.

Punkt-Bewegungen, Geschwindigkeit und Beschleunigung, Geschwindigkeit und Beschleunigung in verschiedenen Koordinaten, Bewegung von Punktsystemen, Kinematik des starren Körpers, Relativ-Bewegungen.

Technische Mechanik III (Kinetik)

F. Pfeiffer

WS / 4 V + 2 Ü + 1 T

Kinetische Grundbegriffe Grundgleichungen, Impulssatz und Schwerpunktsatz, Drallsatz, Energiesatz, Kinetik des starren Körpers, Impuls und Drall des starren Körpers, Trägheitseigenschaften des starren Körpers, kinetische Energie des starren Körpers, Drehbewegungen starrer Körper, Kraftwirkung von Rotoren, Bewegungen eines momentenfreien Kreisels, erzwungene Bewegungen eines Kreisels, Kinetik der Schwerpunktsbewegungen, Bahnbewegungen in zentralen Kraftfeldern, Bewegungen bei Vorhandensein von Widerstandskräften, Bewegungen eines Systems mit veränderlicher Masse, Kinetik der Relativbewegungen, Schwingungen, Pendelschwingungen, Klassifizierung von Schwingungen, freie lineare Schwingungen mit einem Freiheitsgrad, erzwungene Schwingungen, Koppelschwingungen, Stoßprobleme, Beispiele, Methoden der analytischen Mechanik, Zwangsbedingungen, Prinzip von d'Alembert und Lagrange Gleichungen erster Art, Lagrange Gleichungen zweiter Art.

2.4 Vorlesungen zum Hauptdiplom

(K: Klausur-, P: Pflicht-, W: Wahlfach)

Technische Mechanik VI/Kernfach Mechanik

F. Pfeiffer

WS (K,P) 2 V + 2 Ü

Die Vorlesung gibt eine Einführung in die Dynamik mechanischer Systeme. Ausgehend von den wichtigsten Beziehungen der Relativkinematik und des Impuls- und Drallsatzes werden gebundene Systeme betrachtet und eine Auswahl an Darstellungsmöglichkeiten angeboten (Lagrangesche Gleichungen, Newton- Euler-Formalismus in Verbindung mit dem d'Alembertschen Prinzip). Darauf aufbauend behandelt die Vorlesung lineare diskrete und kontinuierliche Systeme und einige klassische Lösungen aus der linearen Algebra, das Eigenverhalten linearer Schwingungssysteme, Stabilitätsfragen sowie die Näherungsverfahren nach Ritz

und Galerkin für kontinuierliche Schwingungssysteme. Einige einfache nichtlineare Schwingungen, die zugehörigen klassischen Näherungen, Stabilität nach Ljapunov und eine ausführliche phänomenologische und experimentelle Darstellung von Entstehungsmechanismen bei Schwingungen (frei, zwangserregt, selbsterregt, parametererregt) schließen die Vorlesung ab.

Höhere Mechanik A (Schwingungsmodelle)

F. Pfeiffer

SS (P,W) 2 V

Die Vorlesung vermittelt Theorie und Praxis der Dynamik mechanischer Systeme mit Schwerpunkt auf Maschinen und Mechanismen, sie bietet eine Maschinendynamik aus der Sicht eines praxiserfahrenen Mechaniklehrstuhles. Es werden die heute üblichen Methoden für starre und elastische Mehrkörpersysteme vorgestellt, angesichts der Anwendungen auf Maschinen und Mechanismen jedoch spezialisiert auf Systeme mit linearer Kinematik, aber beliebigen nichtlinearen Kraftgesetzen. Die Anordnung der Teilkörper, ihre Freiheitsgrade, ihre Referenzbewegungen unterliegen dabei keinen Einschränkungen, beliebige Bindungskonfigurationen sind möglich. Insbesondere werden auch unstetige Prozesse wie Stöße und Haft-Gleit-Vorgänge eingehend betrachtet und in den Formalismus für Mehrkörpersysteme eingebettet. Hierbei kommen neuartige Verfahren für die Beschreibung der Bindungsdynamik zum Einsatz, die erst in den neunziger Jahren entwickelt wurden. Die Vorlesung wendet die vorgestellten Verfahren auf viele aus der industriellen Praxis stammenden Beispiele an, wobei Schwerpunkte in der Antriebstechnik gesetzt werden.

Höhere Mechanik B (Roboterdynamik)

F. Pfeiffer

SS (P,W) 2 V

Industrieroboter sind ideale Anwendungsbeispiele für die Theorie starrer und elastischer Mehrkörpersysteme. Da sie meistens Baumstruktur besitzen, kann hierfür in voller Allgemeinheit die Kinematik und Kinetik angegeben werden. Insbesondere schnelle Roboter müssen sowohl kinetisch als auch von der Steuerung und Regelung her optimal ausgelegt werden. Daher bilden die vier Gebiete Kinematik, Kinetik, Optimierungsverfahren sowie Steuerung und Regelung die Schwerpunkte

dieser Vorlesung.

Kinematik: Relativkinematik, Baumstrukturen, rekursive Algorithmen, DH-Transformation, Inverses Problem, Interpolationsmethoden für Greiferpositionen, Beispiele.

Kinetik: Grundlegende Begriffe (aktive und passive Kräfte), NEWTON-EULER-Gleichungen für Baumstrukturen, Bahnbeschreibung, Beispiele.

Optimale Steuerung: HAMILTON kanonische DGL, Transversalitätsbedingungen, Maximumprinzip von PONTRJAGIN, numerische Verfahren (Gradientenverfahren, NEWTON-Verfahren), Dynamisches Programmieren, Beispiele.

Regelung: Regelungstechnische Grundlagen, Einzelgelenkregelung, Bahnregelung, adaptive und nichtlineare Konzepte.

Dynamik und Regelung von Mechanismen

Th. Thümmel

SS (W) 2V incl. Ü

Unter Mechanismen werden Koppel-, Kurven- oder Räderkoppelgetriebe in Maschinenantrieben, z.B. Textil-, Verpackungs- oder Schneidemaschinen, Sägen, Umformpressen und Zuführeinrichtungen, zusammengefaßt.

Einen Schwerpunkt der Vorlesung bildet die mathematische Beschreibung der Kinematik und Kinetik der Mechanismen. Neben einer Einführung zur Analyse komplexer Mehrkörpersysteme werden an Hand von Minimalmodellen verschiedene mechanische Effekte beschrieben: Anlaufvorgänge und Bewegungszustände der starren Maschine, Fundamentalschwingungen, Biege-, Torsions- und Längsschwingungen elastischer Bauteile, parametererregte Schwingungen, Reibverluste.

Zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens (Schwingungsverhalten) werden die klassischen passiven Methoden des Massen- und Leistungsausgleiches einschließlich Schwungrad, Tilger und Kompensatoren, aber auch Wege zum aktiven dynamischen Ausgleich durch Regelung behandelt. Praktische Fallbeispiele, MKS-Simulationen und ein PC-gesteuerter Mechanismenprüfstand illustrieren die Problematik.

Schwingungsmessung

Th. Thümmel

WS (W) 2V incl. Ü

Die Schwingungsmessung wird als Teil der experimentellen Systemanalyse aufgefaßt. Die Vorlesung vermittelt Grundlagen der experimentellen Maschinendynamik, Strukturmechanik und Mehrkörperdynamik ohne Einschränkung auf eine Branche oder ein Produkt.

Die Messung von Eingangs- und Ausgangsgrößen mechanischer Schwingungssysteme führt über eine Signalanalyse zur Identifizierung des Schwingungsmodells. Damit werden u.a. theoretische Ansätze zu nichtlinearen Schwingungen in Mehrkörpersystemen mit Reibung, Spiel und Stößen verifiziert. Die modalen Systemparameter, Eigenfrequenzen, Eigenschwingformen und Dämpfung, sind neben dem Spektrum der Erregerkräfte der Schlüssel zur gezielten Beeinflussung des dynamischen Verhaltens einer Maschine.

Inhalt: Systematik mechanischer Schwingungen, statisches und dynamisches Verhalten von Schwingungsaufnehmern, Sensorauswahl, Konzeption einer Meßkette, digitale Signalanalyse (Aliasing, GIBB, Leakage, FFT), Frequenzgangmessung, mechanische Schwingungsmodelle, Modalanalyse, Ordnungsanalyse (Wasserfall-diagramme, Wavelets), Maschinendiagnose.

Die Vorlesung wird durch ein umfangreiches Skriptum, Fallbeispiele, Demonstrationsversuche und Exkursionen ergänzt.

Dynamische Systeme

Bis 1996: H. Bremer, ab 1997: Ch. Glocker

WS (W) 2 V + 1 Ü

Die Vorlesung befähigt die Studierenden, die computergerechte Systemtheorie zur Lösung praktischer Probleme der Systemdynamik anzuwenden. Im einzelnen wird behandelt: Modellbildung mechanischer Systeme (Theorie der Mehrkörpersysteme), Prinzipien der Dynamik, Optimierungstheorie und direkte Methoden der Variationsrechnung, Mayer-Problem der Regelungstechnik und Maximumprinzip von Pontrjagin, Struktureigenschaften linearer Systeme (Steuerbarkeit, Beobachtbarkeit, Stabilität), lineare optimale Regelung (Festwertregelung und adaptive Regelung), Parameterempfindlichkeitsanalyse, lineare und nichtlineare Parameterempfindlichkeitsregelung. Die erarbeitete Theorie wird angewendet auf Probleme aus den Bereichen der Robotertechnik, der Rotordynamik (starre Rotoren und Rotoren mit elastischen Bauteilen), der Satellitendynamik und der

Magnetschwebetechnik.

Nicht-glatte dynamische Systeme

Ch. Glocker

SS (W) 3V mit Ü

Die Vorlesung vermittelt Grundlagen zur theoretischen Behandlung von Kraftelementen, die zu Sprüngen in den Beschleunigungen und Geschwindigkeiten von mechanischen Systemen führen können. Am Beispiel verschiedener Kraftgesetze wie einseitige Bindungen, Trockenreibung, Coulombsche Reibung und Stoßgesetze für reibungsfreie und reibungsbehaftete Stöße wird die Problematik der kombinatorischen Suche verträglicher Kontaktzustände erläutert. Ferner wird das Aufstellen der kontaktkinematischen Gleichungen und der Bewegungsgleichungen des mechanischen Systems mit beliebigen Kontaktgesetzen behandelt. Diese Gleichungen werden als Lineares Komplementaritätsproblem formuliert und mit Hilfe von Verfahren aus der Optimierungstheorie gelöst. Speziell werden quadratische Programme, also Optimierungsaufgaben mit streng konvexer quadratischer Form unter Gleichheits- und Ungleichungsnebenbedingungen behandelt. In diesem Zusammenhang werden Kuhn-Tucker-Bedingungen, Lagrangesche Gleichungen der ersten Art, das Prinzip von Gauß, das Prinzip von d'Alembert und das Prinzip des kleinsten Zwangs für Ungleichungen erläutert. Vorlesungsbegleitend werden elementare Beispiele sowie Anwendungen aus dem Bereich der Maschinendynamik vorgestellt.

Lineare Schwingungssysteme

H. Bremer (bis 1996)

SS (W) 2 V mit Ü

Die Vorlesung vermittelt den Studierenden die Grundlagen der Schwingungstechnik. Es werden die Struktureigenschaften, das Eigenverhalten und das Störverhalten von mechanischen Schwingungssystemen behandelt. Darüber hinaus werden Optimierungsfragen der Schwingungstechnik diskutiert. Praktische Beispiele (z. B. Fahrzeug- und Rotorschwingungen), Hinweise auf den Einsatz elektronischer Rechenanlagen und Versuchsvorführungen runden das Vorlesungsprogramm ab. Einzelthemen sind: Einteilung von Schwingungen, Allgemeiner Aufbau von Schwingungssystemen, Zustandsgleichungen, Lineare Schwingungssysteme,

Eigenschwingungen, Schwingungsformen, Stabilität, Optimalität passiver und aktiver Systeme, Zwangsschwingungen, Resonanz, Tilgung, Zufallsschwingungen.

Nichtlineare Schwingungssysteme

H. Bremer (bis 1996)

WS (W) 2 V + 1 Ü

Die Vorlesung führt den Studenten in die Theorie der nichtlinearen Schwingungssysteme ein. Es werden zunächst die grundlegenden Phänomene anhand von Beispielen und Versuchsvorführungen erläutert und diskutiert. Da bislang eine geschlossene Theorie für nichtlineare Schwingungssysteme nicht existiert, werden die klassischen Näherungsmethoden für nichtlineare Systeme diskutiert und angewendet. Neuere Erkenntnisse werden in die Vorlesung eingearbeitet.

Inhalt: Eigenschwingungen nichtlinearer Systeme, Grenzzykel, gleich-, super- und subharmonische Zwangsschwingungen, Kombinationsresonanzen und Mitnahmeeffekte (Synchronisation). Störungsrechnung, Mittelungsmethoden, Stabilitätsbetrachtungen, kanonische Transformationen und Poincaré-Abbildung, chaotische Systeme. Für die Vorlesung steht ein ausführliches Skriptum zur Verfügung.

Technische Dynamik/Mechanik für Mechatronik

Bis 1996: H. Bremer, ab 1997: Ch. Glocker

SS (P,W) 3 V mit Ü

Die Vorlesung vermittelt die Grundlagen der technischen Dynamik mit Anwendungen im theoretischen Maschinenbau. Es werden die Aufstellung mechanischer Ersatzsysteme, die Kinematik in kartesischen und verallgemeinerten Koordinaten, die Newton-Eulerschen Gleichungen, die Lagrangeschen Gleichungen und das Hamiltonsche Prinzip erläutert. Weiterhin werden die inneren und äußeren Kräfte, die Zwangskräfte und die verallgemeinerten Kräfte betrachtet. Als Ergebnis erhält man die Zustandsgleichungen mechanischer Systeme. Die häufig nichtlinearen Gleichungen werden bezüglich der Sollbewegung (Gleichgewichtslage) linearisiert. Hinweise zur Stabilitätsuntersuchung mechanischer Systeme runden das Vorlesungsprogramm ab. Parallel zur Vorlesung werden in einer Übungsstunde praktische Aufgaben und Beispiele aus dem Maschinenbau erläutert.

Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen

W. Kortüm (DLR Oberpfaffenhofen) (bis 2000)

WS (W) 3 V mit Ü

Die Vorlesung vermittelt wesentliche Methoden der Systemdynamik und Regelungstechnik anhand ihrer Anwendung bei bodengebundenen Fahrzeugen (Rad/Schiene-, Magnetschwebe- und Straßenfahrzeuge). Die computergerechte Formulierung dieser Methoden, die Diskussion der Rechenverfahren sowie ein Überblick über die wesentlichen Software-Werkzeuge befähigen den Studenten, komplexe Probleme der Praxis erfolgreich zu bearbeiten.

Inhalt: Modellbildung und Bewegungsgleichungen, lineare und stochastische Systemanalyse, Auslegungs- und Reglerentwurfsverfahren (Polvorgabe, RICCATI-Entwurf), Realisierung mittels Kalman-Filter und digitaler Regelung, Verfahren zur nichtlinearen Systemanalyse und Simulation.

Die Verfahren werden anhand von aktuellen Anwendungsbeispielen aus der Fahrzeugtechnik besprochen. Als Text zur Vorlesung steht das Buch: „Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen“, Springer, 1994, zur Verfügung (Hörerscheine erhältlich).

Einführung in die Strukturoptimierung

H. Röhrle (DORNIER Friedrichshafen) (bis 1998)

WS (W) 1 V + $\frac{1}{2}$ Ü

Für verschiedenartige Problemstellungen aus der Technischen Mechanik werden Optimierungsaufgaben formuliert und mit klassischen oder numerischen Methoden gelöst. Die Optimierung ist hierbei der Vorgang, unter den gegebenen Umständen das bestmögliche Resultat zu erzielen.

Inhalt: Ingenieurprobleme der Optimierung, Klassifikation und Definition von Optimierungsaufgaben, klassische Optimierungsmethoden, Methode der Lagrange-Multiplikatoren, ableitungsfreie Methoden, sequentielle lineare Optimierung, Gradienten in der Strukturmechanik.

Die verschiedenen Verfahren werden anhand von ausführlichen Beispielrechnungen näher erläutert.

Mathematische Methoden der Strukturoptimierung

H. Röhrle (DORNIER Friedrichshafen) (bis 1998)

SS (W) 1 V + $\frac{1}{2}$ Ü

Die Vorlesung behandelt an einem ausgewählten Beispiel der Strukturoptimierung verschiedene lineare und nichtlineare mathematische Optimierungsmethoden. Die Optimierungsaufgabe besteht darin, ein Tragwerk in seinen Dicken, Stabquerschnittsflächen und weiteren Parameter so auszulegen, daß bei ausreichender Festigkeit und Steifigkeit das Eigengewicht minimal wird.

Inhalt: Mathematische Formulierung des Problems, Gradienten in der Strukturmechanik, mathematische Methoden der eindimensionalen Optimierung, nichtlineare Optimierung ohne und mit Nebenbedingungen, Beispiele.

Strukturdynamik

R. Freymann (BMW, München)

WS (W), 2V mit Ü, 14-tägig

Ausgehend von den schwingungstechnischen Grundlagen wird auf das strukturdynamische Verhalten komplexer schwingungsfähiger Systeme mit einer Vielzahl von Freiheitsgraden eingegangen. Behandelt werden dabei praxisorientierte Verfahren, wie z.B. die Finite-Elemente-Berechnung, die modale Korrekturrechnung und die strukturelle Optimierung. Ein Umfang befaßt sich mit der Thematik von aktiv geregelten Strukturen, wobei ein besonderer Fokus auf den Einsatz von servohydraulischen und piezoelektrischen Stellgliedern gerichtet ist. Weiterhin aufgeführt werden speziell Themengebiete aus dem Fachbereich der "strukturellen Akustik", wie z.B. die Körperschallübertragung und die Struktur-Hohlraum-Kopplung. Abschließend wird auf experimentelle Verfahren zur Ermittlung des Schwingungsverhaltens komplexer strukturdynamischer Systeme eingegangen. Viel Wert wird auf die beispielhafte Anwendung der verschiedenen Verfahrenstechniken auf praxisrelevante Fragestellungen -aus dem Luftfahrt- und Automobilbereich - gelegt.

2.5 Weitere Lehrveranstaltungen

Mechanik-Kolloquium des Instituts für Mechanik

WS/SS

Das Mechanik-Kolloquium ist eine Veranstaltung der Mechanik-Lehrstühle im Fachbereich Maschinenwesen. Es dient der Vorstellung und Diskussion neuer wissenschaftlicher Ergebnisse in allen Gebieten der Mechanik. Die Vortragenden kommen sowohl aus den Bereichen der Industrie als auch der Hochschulen des In- und Auslands.

Seminar über Fragen der Mechanik

WS/SS

Diese Veranstaltung richtet sich an Mitarbeiter aus Industrie und Hochschule. Im Rahmen dieses Seminars können sich Studierende höherer Semester in die Arbeits- und Forschungsgebiete des Lehrstuhls einarbeiten und Voraussetzungen für die Durchführung von Diplom- und Doktorarbeiten schaffen. In jedem Semester werden bestimmte Themenkreise herausgegriffen. Themen vergangener Semester: Schienenfahrzeuge, Rotorsysteme, Roboterdynamik, nichtlineare Schwingungen.

Seminar für Diplomanden und Semesteranden

WS, SS

Im Rahmen dieser Veranstaltung wird den Bearbeitern von Semester- und Diplomarbeiten die Möglichkeit geboten, ihre Ergebnisse zu präsentieren. Dieses Seminar richtet sich an interessierte Studenten höherer Semester sowie an Mitarbeiter des Lehrstuhls und findet nach besonderer Ankündigung statt.

Seminar über Software-Engineering und Prozeßdatenverarbeitung

WS, SS

Das Seminar wendet sich an Studenten und Mitarbeiter des Lehrstuhls. Der Bereich Software-Engineering beschäftigt sich hauptsächlich mit der Simulation mechanischer Systeme. In den Bereich Prozeßdatenverarbeitung fällt die Erfassung und die digitale Regelung mechatronischer Systeme. Das Seminar findet in unregelmäßigen Abständen statt.

Mechanikpraktikum für Fortgeschrittene

Th. Thümmel

WS

Das Mechanikpraktikum vertieft die Kenntnisse auf dem Gebiet der Dynamik und Schwingungen und veranschaulicht wesentliche physikalische Schwingungsphänomene. Jeder Teilnehmer erhält ausführliche gedruckte Theorie- und Versuchsbeschreibungen. Eine persönliche Ausarbeitung und ein schriftlicher Test dienen zur Bewertung.

Zur Zeit werden folgende Versuche durchgeführt:

1. MTM – Bestimmung der Massenträgheitsmomente und Trägheitsachsen mit einem Torsionspendel.
2. Auswuchten – Auswuchten eines starren Rotors.
3. Rüttelpendel – Stabilität parametererregter Schwingungen
4. Reibpendel – Phasenkurven selbsterregter Schwingungen.
5. Balancierstab – Stabilisierung des stehenden Pendels auf einem magnetgetriebenen Wagen durch einen Regelkreis.
6. Exkursion in ein renommiertes Meßlabor, z.B. BMW, DB, MTU, MAN.

Schwingungsmeßpraktikum

Th. Thümmel

SS

Das Praktikum über Schwingungsmessung vertieft die Mechanikkenntnisse in den experimentellen Gebieten Meßtechnik, Signalanalyse und Modalanalyse. Jeder Teilnehmer erhält ausführliche gedruckte Theorie- und Versuchsbeschreibungen. Ein schriftlicher Test dient zur Bewertung. Als Ergänzung wird die Vorlesung Schwingungsmessung empfohlen. Inhalt: Grundlagen, Sensoren und Erreger, Meßkette, Signalanalyse, Frequenzgangmessung, Modalanalyse.

Das Praktikum besteht aus den folgenden Versuchen:

1. FFT – Analyse verschiedener synthetischer Signale mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation.
2. Magnetlager – Bestimmung der statischen und dynamischen Kenngrößen eines Magnetlagers als Stellglied in einem Regelkreis.
3. DMS – Messungen mit Dehnmeßstreifen.
4. Balken – Standschwingversuch zur Bestimmung der Modalparameter am Beispiel des einseitig eingespannten Balkens mit Endmasse und Feder.
5. Modalanalyse – Identifikation der Modalparameter eines Ständers durch Impulsanregung, Frequenzgangmessung und Curve-Fitting.
6. Exkursion in ein renommiertes Meßlabor, z.B. BMW, DB, MTU, MAN.

Rechnerpraktikum für Simulationstechnik

SS

Das Praktikum vermittelt die Kenntnisse digitaler Simulationstechnik unter Verwendung von Software-Produkten. Es findet zunächst eine Einführung in das Programmsystem SIMPACK (Mehrkörpersimulation) statt. Die Einarbeitung erfolgt anhand kleinerer Beispiele (insgesamt 12 Stunden). Anschließend werden selbständige Arbeiten aus dem Gebiet der Fahrzeugdynamik durchgeführt (12 Stunden). Das Praktikum findet bei der DLR in Oberpfaffenhofen statt. Voraussetzung ist die erfolgreiche Teilnahme an der Vorlesung "Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen" (Kortüm).

3 Forschung

3.1 Überblick

Die Forschungen am Lehrstuhl B für Mechanik lassen sich in drei Bereiche gliedern, die von den grundlegenden Verfahren her miteinander verzahnt sind. Der alles umfassende Schwerpunkt kann *Dynamik, Regelung* und *Optimierung* von *Mehrkörpersystemen* genannt werden, worunter mechanische Systeme verstanden sein sollen, deren Bauteile und Komponenten sich aus starren Körpern, aus elastischen Körpern, aus flüssigen Anteilen und den zugehörigen Verbindungselementen zusammensetzen. Diese Verbindungselemente können aktiv und auch passiv sein; sie bestimmen die Art der das System beherrschenden Zwangsbedingungen. Im aktiven Fall sind sie häufig selbst Bestandteil eines Regelungskonzeptes für das betrachtete System. Weiterhin können solche Verbindungselemente eine einseitige oder zweiseitige Wirkung haben. Klassischerweise hat man bisher meistens zweiseitige Bindungen betrachtet, erst in jüngerer Zeit sind einseitige Bindungen behandelt worden. Solche Bindungen lassen sich wieder lösen und sind geeignet, um Kontaktprozesse wie Stöße oder Reibung zu modellieren.

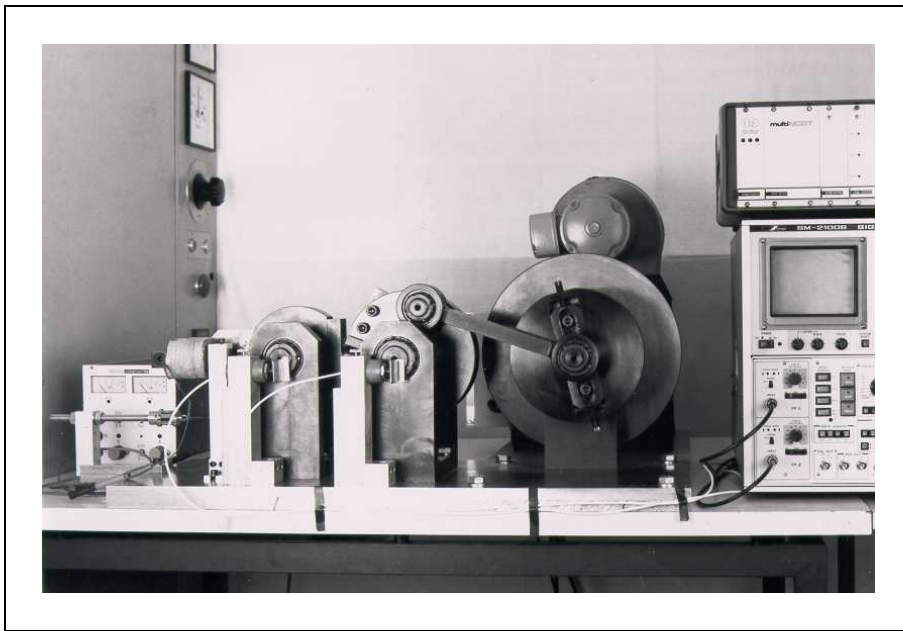


Abbildung 5: Prüfstand zur Untersuchung von Getrieberasseln

Das zentrale Fachgebiet ist die Mechanik, im Falle unseres Lehrstuhls verschiedene Kombinationen aus Mehrkörperdynamik, Elastodynamik und Kontaktmechanik. Mehrkörpersysteme und Elastodynamik führen zu den elastischen Mehrkörpersystemen, Mehrkörperdynamik und Kontaktmechanik sind Elemente der nichtglatten Dynamik mit mengenwertigen Kraftgesetzen. Nimmt man Regelung und Optimierung hinzu, so ist damit das fachliche Spektrum umschrieben.

Grundlagenarbeit wird besonders für die nicht-glatten Systeme, im Bereich des Laufens und im großen Gebiet der nichtlinearen Schwingungen geleistet. Mehrkörpersysteme mit einseitigen Bindungen, insbesondere mit solchen, die untereinander nicht entkoppelt sind, haben sich zu einem deutlichen Schwerpunkt des Lehrstuhls entwickelt. Stöße und Haft-Gleit-Phänomene in Kontakten erzeugen solche einseitigen Bindungen, die über kinematische und kinetische Indikatoren abgefragt werden müssen. Das dabei entstehende kombinatorische Problem der Bindungskonfigurationen kann mit Hilfe von linearen oder nichtlinearen Komplementaritätsalgorithmen gelöst werden.

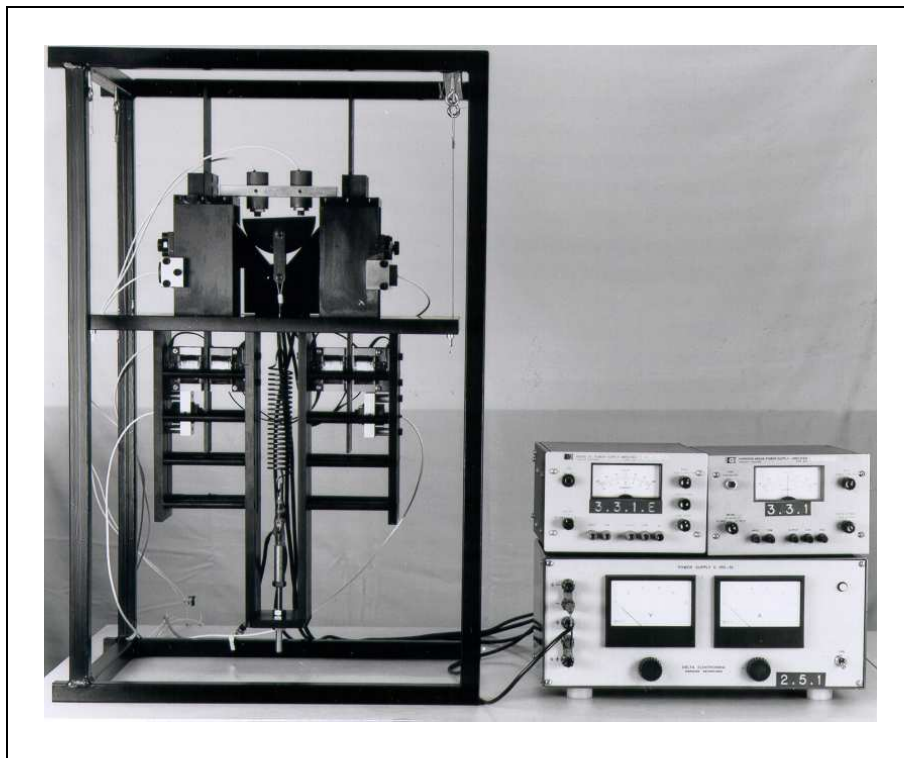


Abbildung 6: Prüfstand für Turbinendämpfer als System mit Haft/Gleit-Übergängen

Hervorgehoben seien in diesem Zusammenhang die Bemühungen um die Erstellung einer einheitlichen und in sich konsistenten Reibstoßtheorie. Sie berücksichtigt die Speicherung von Normal- und Tangentialimpulsen während des Stoßes und erfaßt die teilweise Rückgewinnung dieser gespeicherten Impulse über das Reibgesetz und Poisson. Viele bisher nicht lösbare Probleme konnten damit erfolgreich behandelt werden. Die Reibstoßtheorie wurde auch durch geeignete Wurfexperimente in allen Bereichen und im Detail experimentell abgesichert. Dies war Gegenstand einer Dissertation, die alle theoretischen Konzepte in überzeugender Weise bestätigen konnte. An diesem Ansatz zur Modellierung von Reibstößen wird weitergearbeitet.

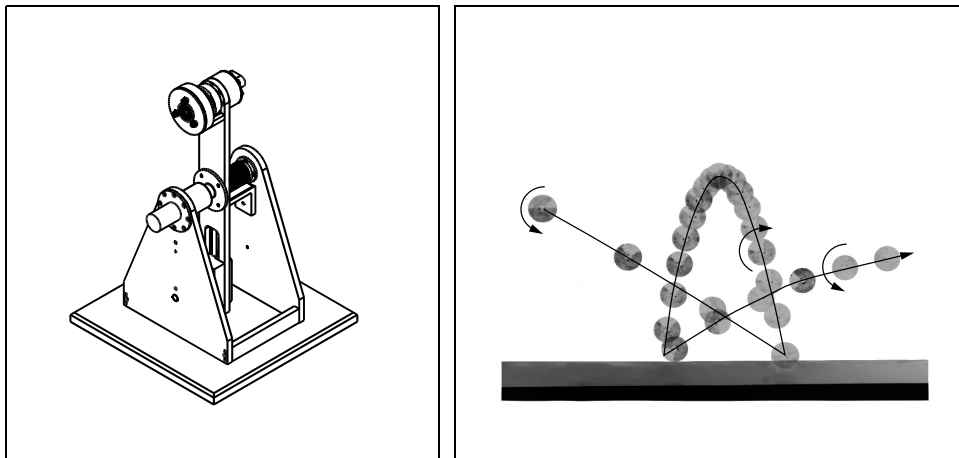


Abbildung 7: Wurfmaschine zur Untersuchung von Reibstößen, Wurfexperiment

Die Anwendung dieser Grundlagen auf Probleme der Maschinendynamik und hierbei besonders auf solche der Antriebstechnik liegt auf der Hand. Die Behandlung von Getriebe- und Antriebsstrangproblemen sowohl im Anlagenbau als auch im Transportwesen hat zu Verfahren geführt, die die speziellen Eigenschaften solcher Maschinenkomponenten berücksichtigen. Gerade auf diesem Gebiet wurden und werden viele Probleme in enger Zusammenarbeit mit der Industrie betrachtet und gelöst. Dies betrifft beispielsweise die Kettendynamik, einmal von Steuerketten im Rahmen von FVV-Vorhaben und zum anderen von CVT-Ketten im Rahmen eines Sonderforschungsbereiches. Die Dynamik von Ketten stellt ein extrem schwieriges Modellierungsproblem dar, das den Einsatz aller Methoden der Mehrkörpertheorie, der Kontaktmechanik mit den entsprechenden Komplementaritätsverfahren und der modernen Numerik für nichtglatte Systeme verlangt. Auch die experimentelle Untersuchung schnelllaufender Ketten erfordert modernste Meßtechnik.

Ein beachtlicher Anteil der Drittmittelforschung beschäftigte sich bis in die 90er Jahre hinein mit Schwingungsproblemen von Luftfahrttriebwerken. Die außerordentlich große Komplexität solcher Triebwerke läßt dabei eigentlich nur zwei Vorgehensweisen zu. Entweder man versucht, alle Details zu erfassen, wie es häufig bei Strömungs- und Schwingungsuntersuchungen mit Hilfe finiter Elemente oder finiter Differenzen getan wird, oder man versucht das genaue Gegenteil, nämlich eine extrem grobe Modellierung, mit dem dann nur sehr schwer zu realisierenden Anspruch, alle wichtigen Einflußgrößen auch erfaßt zu haben. Letzteres erfordert einen sehr sicheren Überblick der physikalisch-technischen Vorgänge im Triebwerk.

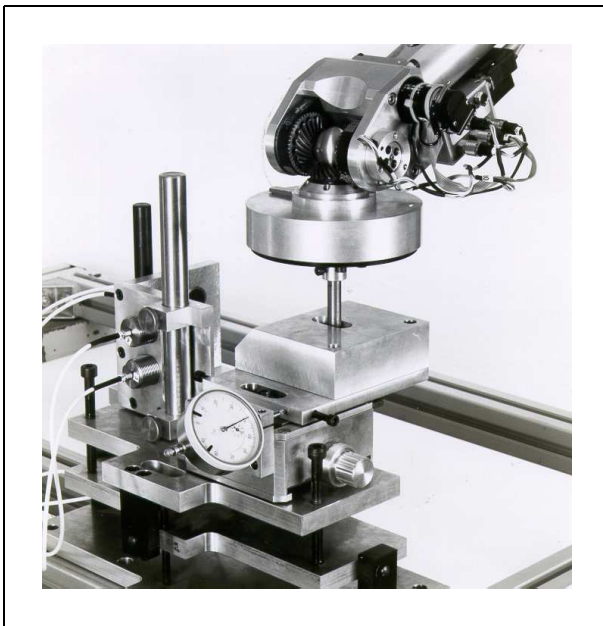


Abbildung 8: Untersuchung von Fügeprozessen (SFB 336)

Beide Lösungsansätze sind für verschiedene Projekte aus diesem Bereich verwendet worden. Es wurde auch das Problem der Triebwerksüberwachung mit Hilfe einer Langzeit-Schwingungsdiagnose aufgegriffen. Ziel dabei ist die frühzeitige Erkennung von Schadenspotentialen durch ein zeitliches Verfolgen von Schwingungsindikatoren, die aus den gemessenen Schwingungsspektren bzw. Wasserfalldiagrammen gewonnen werden.

Ein weiterer Anwendungsbereich der Verfahren der Mehrkörpersysteme besteht in der dynamischen *Beschreibung und Regelung von Industrierobotern*. Nachdem die Entwicklung neuer Bahnpla-

nungsverfahren sowie der Methoden für die Steuerung und Regelung elastischer Roboter unter Berücksichtigung beliebiger Kräfte am Greifer erfolgreich abgeschlossen werden konnte, stand in den späteren Jahren besonders die Übertragung dieser Verfahren auf handelsübliche Industrieroboter und ihr Einsatz für Montageprozesse an. Dies ist unter anderem Forschungsgegenstand des Sonderforschungsbereiches 336 mit dem Titel „*Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung*“, an dem der Lehrstuhl seit 1989 zusammen mit vier weiteren Lehrstühlen (iwb, Prof. Milberg; KM, Prof. Ehrlenspiel; FGB,

Prof. Heinzl; AIBWL, Prof. Reichwald) mitarbeitet. Die Kombination von Roboterdynamik und Montageprozessen erfordert zusätzliche Anstrengungen zur Behandlung kontaktdynamischer Vorgänge, was die Arbeiten über nichtlineare Dynamik wesentlich befruchtet hat.

Das Thema Robotik wurde in Richtung Laufen und Greifen unter Einschluß neuartiger Regelungskonzepte erweitert. Eine langjährige Zusammenarbeit mit dem Bielefelder Neurobiologen Prof. Cruse brachte nicht nur faszinierende Ergebnisse zur Laufdynamik und zur Laufregelung, sondern mündete in eine neue Bein konstruktion ein, die biologische Auslegungskriterien benutzt und Basis für eine Laufmaschine ist. Die sechsbeinige Laufmaschine MAX konnte sehr erfolgreich realisiert werden. Sie war Auslöser für den Körperpreis 1993 und erregte nicht nur deshalb öffentliches Aufsehen. Eine Erweiterung dieser Aktivitäten erfolgte mit

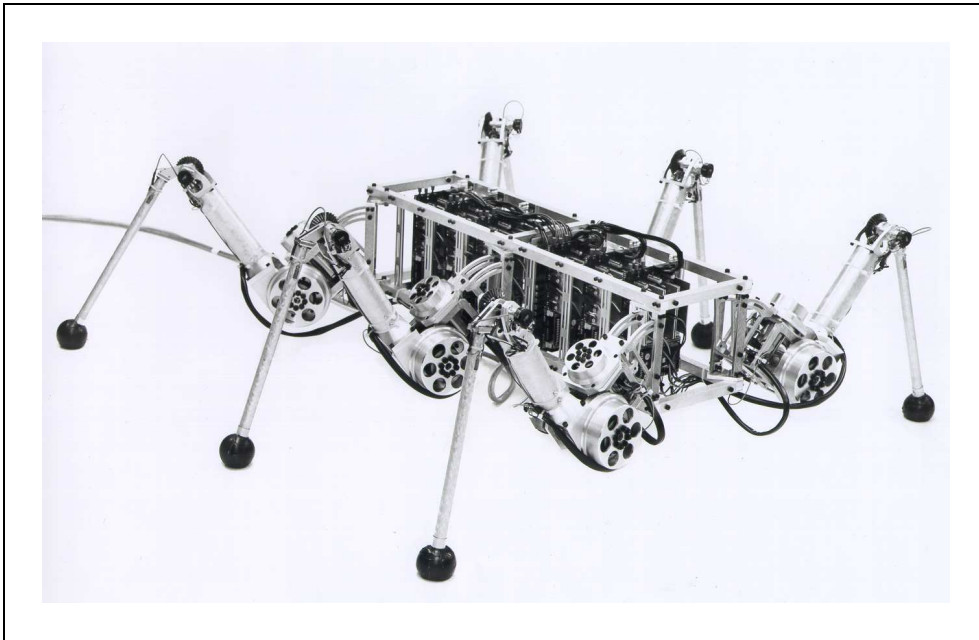


Abbildung 9: Sechsbeinige Laufmaschine MAX

dem Projekt SEKON „*Sensorische Kontrolle mit neuronalen Netzen*“, das, vom BMFT finanziert, zwei Neurobiologen in Bielefeld und Kassel, einen Informatiker in Bielefeld und uns in München verband, um Roboterbewegungen und Greifvorgänge mit neuronalen Netzen zu koordinieren, wobei eine gewisse selbständige Entscheidungsfähigkeit erreicht werden sollte. Der Lehrstuhl B für Mechanik entwickelte in diesem Zusammenhang eine Hand mit hydraulischen Fingerantrieben, stellte zwei kooperierende Roboter zur Verfügung und erstellte die Software für

die Dynamik und Regelung solcher Systeme unter Benützung der von den Neurobiologen und Informatikern kommenden neuronalen Netzen. Die künstliche Hand hat inzwischen ihre Leistungsfähigkeit vielfach unter Beweis gestellt. Sie wurde 1994 auf zwei Industriemessen vorgeführt.



Abbildung 10: Hydraulische Hand

Mit den Mitteln des Körber-Preises wurde ein Rohrkrabbler entwickelt, der in der Lage sein sollte, durch Rohre und Rohrkrümmer zu laufen. Nach umfangreichen Vorarbeiten, an denen auch Kollegen in Moskau teilnahmen, entschieden wir uns für eine achtbeinige Version, die entwickelt und realisiert wurde. Der hierbei notwendige Aufwand an Sensorik, Aktorik, Regelung und bei der Behandlung der Dynamik überstieg bei weitem denjenigen der sechsbeinigen Laufmaschine.

Dennoch konnte ein Gerät mit sehr großem Erfolg verwirklicht und auf vielen nationalen und internationalen Messen vorgeführt werden. Die achtbeinige Laufmaschine MORITZ hat alle Anforderungen erfüllt. Sie ist ein Musterbeispiel für ein mechatronisches Gerät und war und ist für den Lehrstuhl eine Art Technologieplattform zum Studium neuartiger Verfahren in der Regelung, der Sensorik und der Aktorik.

Die Beschäftigung mit Laufmaschinen und den dahinterstehenden Regelungsstrukturen hatte Auswirkungen auf Projekte mit Medizinerinnen. Dies betrifft besonders die Zusammenarbeit mit Neurologen der LMU in Großhadern und mit der Neurologischen Klinik in Bad Aibling im Rahmen eines Sonderforschungsbereiches. Bei dem Projekt handelt es sich um die computer- und modellgestützte Elektrostimulation von Hemiparetikern. Hier erhofft man sich durch die Verknüpfung mit der Computersimulation eine schnellere Rehabilitation von Hemiparetikern.

Nach fast 10jährigen Bemühungen ist es im Jahre 1998 gelungen, ein Schwerpunktprogramm über “Autonomes Laufen” in Gang zu setzen. An diesem Schwerpunktprogramm sind insgesamt 14 Institute in Deutschland beteiligt, die sich etwa zur Hälfte auf Biologen und Ingenieure aufteilen. In diesem Rahmen entwickelt und realisiert der Lehrstuhl B für Mechanik eine zweibeinige Laufmaschine. Die Zusammenarbeit mit den Medizinerinnen auf dem Gebiet der modellgestützten Elektrostimulation für Hemiparetiker wirkt sich dabei sehr befruchtend auf den Fortgang der Arbeiten für die zweibeinige Laufmaschine aus, da hiermit ein leichter Zugang zu Laufdaten für den Menschen möglich geworden ist.

Das Ergebnis dieser Forschungen ist JOHNNIE, die einzige europäische zweibeinige Laufmaschine, die an die Japaner heran- und in einigen Punkten darüber hinauskommt. JOHNNIE besitzt 17 Gelenke, fast 1000 Bauteile und wiegt 45 kg. Sie verfügt über etwa 80 Sensoren und eine dreilagige Reglerstruktur, die sämtliche Freiheitsgrade gleichzeitig regelt, um Laufstabilität zu garantieren. JOHNNIE ist an der Grenze dessen, was ein Universitätslehrstuhl realisieren kann, aber er lief und läuft sehr erfolgreich, auf vielen Ausstellungen und Messen. Er wird Ausgangspunkt für die Laufmaschinen der nächsten Generation sein.

Schließlich stellt die Kombination von mechanischen und elektronischen Komponenten, heutzutage Mechatronik genannt, ein wichtiges Forschungsgebiet des Lehrstuhles dar. Hierunter kann man alle oben genannten Robotik-Arbeiten einordnen, ebenso einige Arbeiten im Bereich Schwingungen, sofern diese geregelt werden, und schließlich die Arbeiten über geregelte elastische Rotoren und ge-

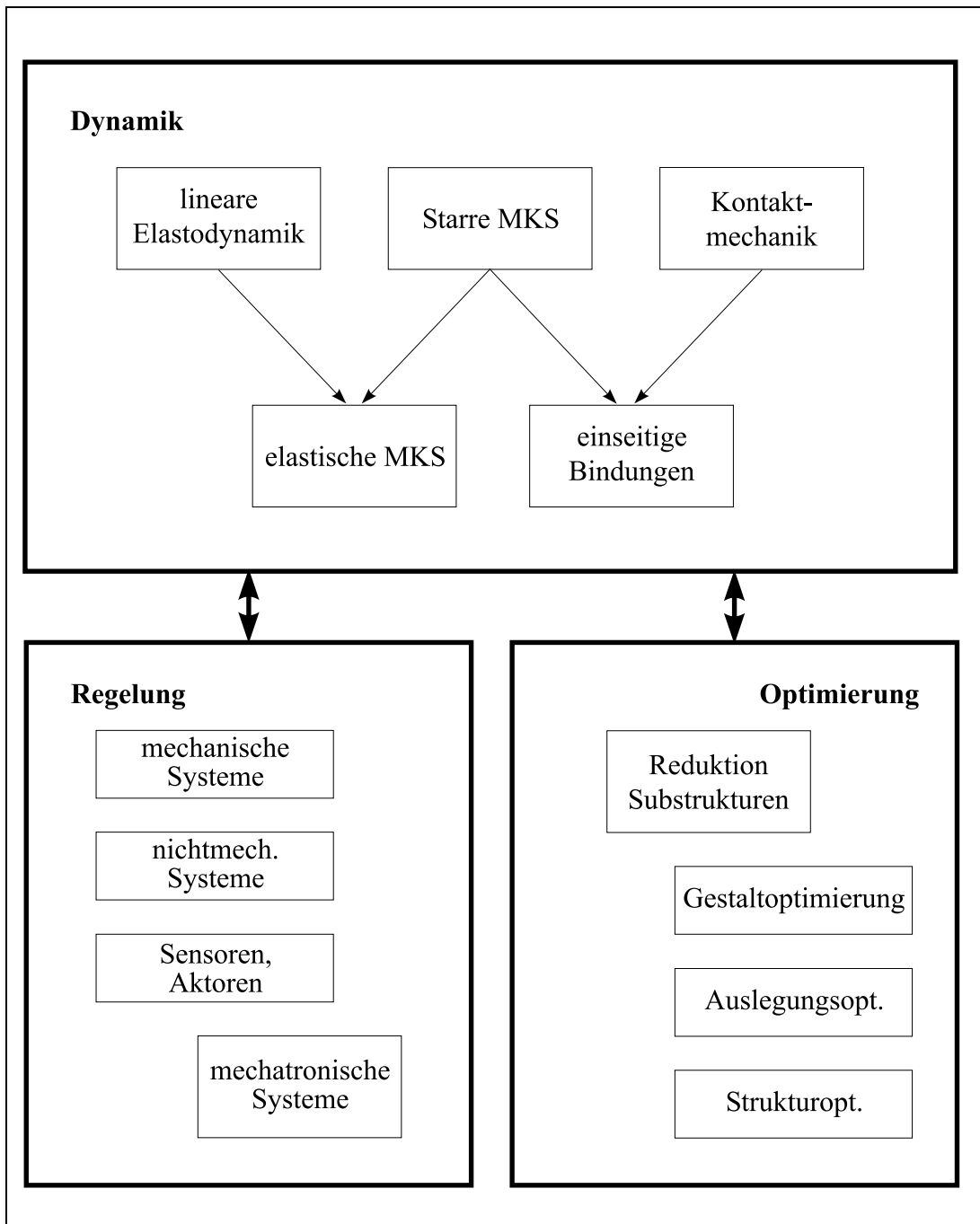
regelte ebene Mechanismen. Das Thema zur Regelung elastischer Mechanismen wurde aufgegriffen, weil bei diesem Thema alle am Lehrstuhl bereits vorhandenen Funktionselemente eingesetzt werden können: elastische Mehrkörpersysteme, Regelung, Optimierung und die zugehörigen Meßtechniken. Inzwischen wurde mit DFG-Mitteln ein Prüfstand zur Regelung von Mechanismen entwickelt und erfolgreich erprobt und 1996 auf einer Messe präsentiert.

In allen drei Forschungsgebieten stellt die Anwendung von modernen *Meß- und Steuerungskonzepten* eine unverzichtbare Voraussetzung für die Untersuchung der dynamischen Probleme dar. Dies geschieht zum Teil in engem Kontakt mit entsprechenden Lehrstühlen und Experten. Die gerätetechnische Seite in der Dynamikforschung zeichnet sich demgemäß durch großen elektronischen Aufwand aus, der im allgemeinen den Aufwand bei den mechanischen Bauteilen um ein Mehrfaches übersteigt.

Die folgenden Bilder versuchen einen strukturellen Überblick.

	Fachgebiete Schwerpunkte	Mehr- körper- dynamik	Elasto- dynamik	Kontakt- mechanik	Regelung	Optimie- rung
GRUND- LAGEN	Methoden und Verfahren	•		•	○	
	Nichtlineare Schwingungen	•	○	•		○
MASCHI- NEN	Maschinen- dynamik	•	•	•	•	•
	Antriebs- dynamik	•	•	•	○	•
ROBOTIK	Montageauto- matisierung	•	○	•	•	•
	Robotik, Lau- fen, Greifen	•	•	•	•	•

Forschungsmatrix



Fachliche Strukturen

3.2 Forschung im Lichte der Promotionen und Habilitationen

3.2.1 Grundlagen

3.2.1.1 Mehrkörpertheorie und nichtlineare Dynamik

Grundlagenforschung am Lehrstuhl B für Mechanik bezog sich im weitesten Sinne immer auf die Weiterentwicklung der Mehrkörpertheorien bis hin zu den neuen Strukturen der nichtglatten Systeme. Am Anfang ging es besonders darum, den seit den fünfziger Jahren dauernden Expertenstreit um die beste Methode für die Beschreibung von Mehrkörpersystemen nicht einfach mitzumachen, sondern durch Erarbeitung einer kompakten und in sich konsistenten Theorie einen Beitrag für die Klärung der offenen Fragen zu leisten.

Hier hat sich besonders BREMER verdient gemacht, der in seinen beiden Büchern die Vorteile der auch heute noch benutzten Projektionsmethoden nach Newton/Euler nicht nur überzeugend nachwies, sondern auch in sehr kompakter und anwendungsfreundlicher Weise darstellte (H. Bremer, Dynamik und Regelung mechanischer Systeme, Teubner Studienbücher Mechanik, Teubner Verlag Stuttgart, 1988). Diese Aussage gilt in gleichem Maße für die von ihm entwickelte Theorie für elastische Mehrkörpersysteme, die natürlich auch damals schon weltweit Vorgänger hatte, aber nirgends so einheitlich und logisch verfasst wurde wie von ihm (Habilitation BREMER 1983 und H. Bremer, F. Pfeiffer, Elastische Mehrkörpersysteme, Teubner Studienbücher Mechanik, Teubner Verlag Stuttgart, 1992). Seine Formulierungen sind bis heute Basis vieler Dissertationen nicht nur in München, sondern auch an vielen anderen Lehrstühlen. Beispiele am eigenen Lehrstuhl sind die grundlegende Arbeit von SORGE (1993), die noch einmal die Gleichungsstrukturen für elastische Mehrkörpersysteme in computer-geeigneter Form aufarbeitet, und die noch später zu nennende Arbeit von RICHTER (1991), die die erste geschlossene Theorie für elastische Roboter entwickelt und dabei viele grundsätzliche Probleme behandelt. In diesem Zusammenhang muss noch eine ganz außergewöhnliche Diplomarbeit hervorgehoben werden, nämlich die von JOHANNI (1984). Sie besitzt das Format einer Dissertation. Er brachte in nur sechs Monaten die Theorie für elastische Mehrkörpersysteme in eine Form, die viele Jahre als Grundlage für die Umsetzung in Computerprogramme diente, auch im kommerziellen Sinne. Bedauerlicherweise hat er diese Arbeit nie veröffentlicht, obwohl sie sehr häufig zitiert wurde.

Während meiner sechzehn-jährigen Tätigkeit bei der Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH (MBB) hatte ich mich selbst als auch einer meiner damaligen Mitarbeiter mit Problemen der rotierenden Flüssigkeiten in Treibstofftanks beschäftigt, ein Thema, das beim ersten europäischen Nachrichtensatelliten SYMPHONIE wichtig wurde. Er besaß eine mit flüssigem Treibstoff angetriebene Rakete, die für die Zirkularisierung des Satelliten den im Apogäum notwendigen Impuls lieferte. Da SYMPHONIE im Perigäum aufgedrallt und dann während des Hohmann-Transfers mit zwei Hertz spinstabilisiert wurde, entstand damit das Problem eines flüssigkeitsgefüllten

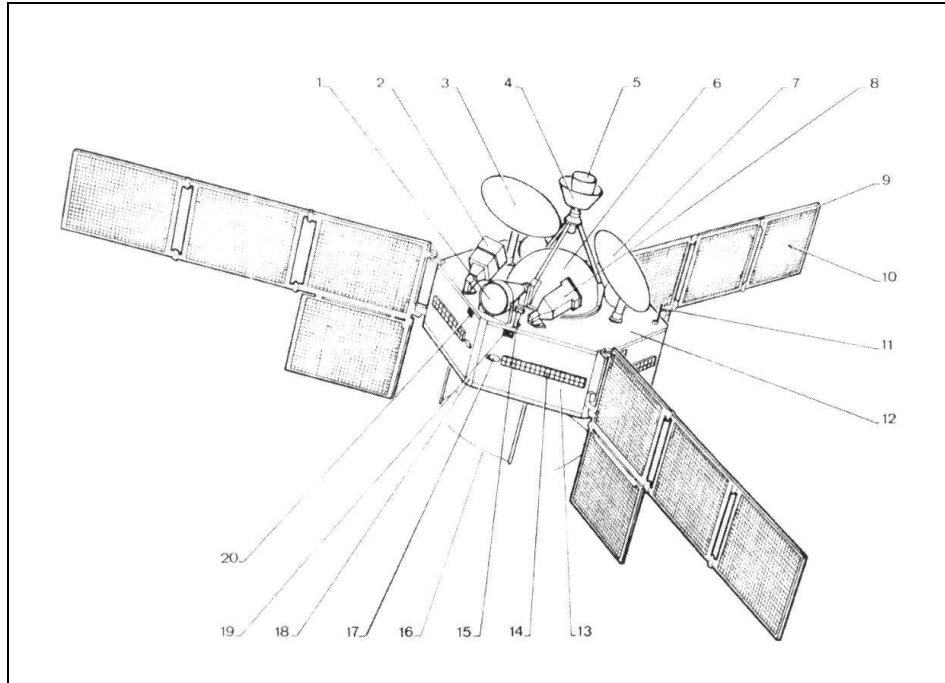


Abbildung 11: Satellit Symphonie

Kreisels, der in keiner Phase instabil werden durfte. Wir konnten damals bei MBB die Probleme lösen, die Einschussgenauigkeiten übertrafen alle Erwartungen (zweimal besser als 0.1%), es blieben aber noch einige Fragen offen. Sie konnten nach meinem Wechsel zur TU-München in zwei Dissertationen geklärt werden. BRANDL (1986) untersucht Schwingungs- und Stabilitätsprobleme von flüssigkeitsgefüllten Kreiseln und betrachtet dabei auch das bis dahin nicht gelöste Problem der nur teilweisen Füllung und damit das Problem der freien rotierenden Oberflächen mit Oberflächenschwingungen. Seine auf der Basis der MBB-Arbeiten entwickelte Theorie ist sehr allgemein. Er verifizierte sie mit Hilfe ziem-

lich aufwendiger Versuche. HACHMANN (1989) führte diese Forschungen mit einer Betrachtung viskoser Effekte weiter. Viskose Reibung findet zwischen Flüssigkeit und Behälterwand sowie in der Flüssigkeit selbst statt, wobei der erste Einfluss überwiegt. Obwohl auch dieser klein ist, spielt er bei den langen Satellitenlaufzeiten für die Dämpfung des Systems eine wichtige Rolle. Für nicht zu lange Zeiten kann man durchaus daran denken, Reibungseffekte, die etwa bei der Drehung eines Kreisels um die Achse des kleinsten Hauptträgheitsmomentes zu Instabilitäten führen, auch auszuregeln. Herr HACHMANN hat zur Größenordnung dieser Effekte sehr sorgfältige Rechnungen und Messungen durchgeführt.

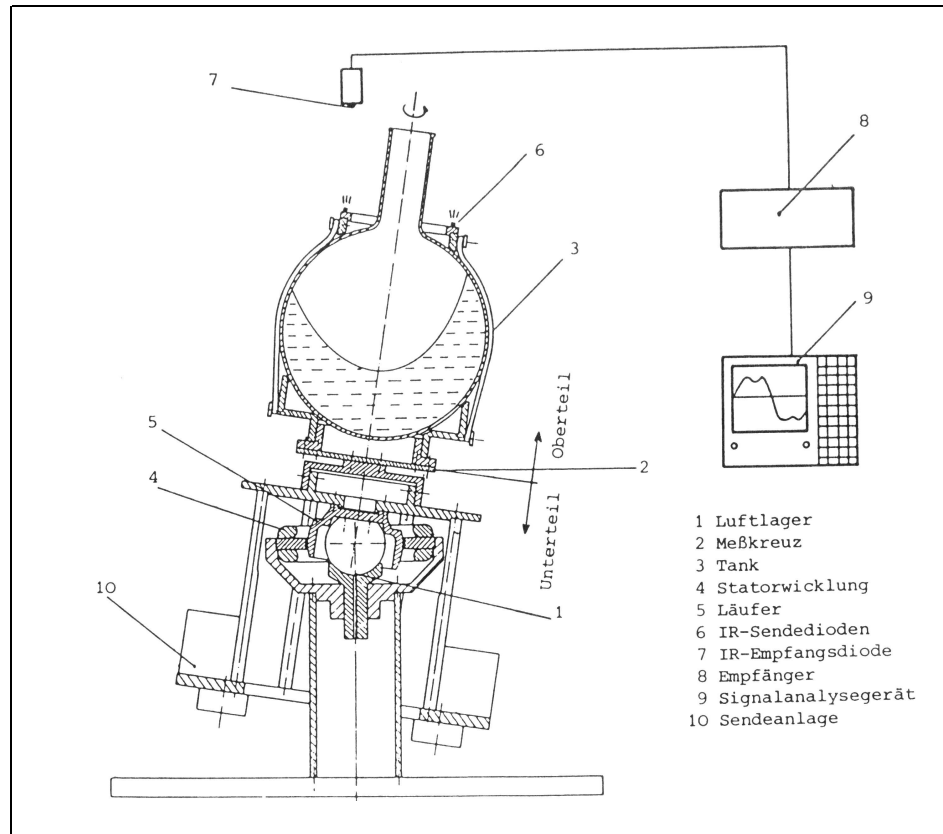


Abbildung 12: Aufbau des Kreiselprüfstands

Als Lösungsmöglichkeit der aus der Mehrkörpertheorie stammenden Bewegungsgleichungen bieten sich, gegebenenfalls natürlich, die Verfahren der nichtlinearen Dynamik im klassischen Sinne, wie sie damals etwa in den Büchern von Kauderer und Magnus dargestellt, oder im modernen Sinne an, wie sie bei Guckenheimer/Holmes, Thompson oder Moon zu finden sind. Diese modernen Theorien ermöglichen eine Darstellung der Strukturen nichtlinearer Erscheinungen mit Hilfe

von Fixpunkten, Bifurkationen und Attraktoren, um nur einige wichtige Aspekte zu nennen. Hier reihen sich in der einen oder anderen Weise die Arbeiten von Johanni, Reithmeier, Karagiannis und Kunert ein. Ausgehend von bereits vorhandenen Vorarbeiten entwickelte JOHANNI (1988) eine analytische Lösung des Bahnoptimierungsproblems für allgemeine Roboterkonfigurationen mit beliebig vielen Gelenken. Dies ist unter der Annahme möglich, dass der Roboter einer vorgegebenen Bahn in idealer Weise folgt und damit nur einen Freiheitsgrad unabhängig von der Zahl der Gelenke besitzt, den man mit Hilfe der Bahnkoordinate ausdrücken kann. Die daraus entstehenden Gleichungen kann man mit klassischen Methoden der nichtlinearen Dynamik topologisch-analytisch lösen. Dies war damals trotz der Bemühungen zweier Kollegen in USA weltweit einmalig.

Einen Schritt weiter geht EDUARD REITHMEIER (1989), der moderne Methoden der nichtlinearen Dynamik einsetzt, um für allgemeine nichtlineare Schwingungssysteme Lösungen zu finden. Herr Reithmeier setzt sich das Ziel, erstens Verfahren zu entwickeln, um Fixpunkte und periodische Lösungen nichtlinearer Schwingungssysteme numerisch zu berechnen, zweitens die numerisch gefundenen Lösungen hinsichtlich ihres Stabilitäts- und Bifurkationsverhaltens zu untersuchen und drittens mit Hilfe der Normalformtheorie von Poincaré und Siegel sowie mit Hilfe der Ergebnisse über das Stabilitäts- und Bifurkationsverhalten einen Zusammenhang zwischen den periodischen Lösungen und dem Gesamtlösungsverhalten des Systems herzustellen.

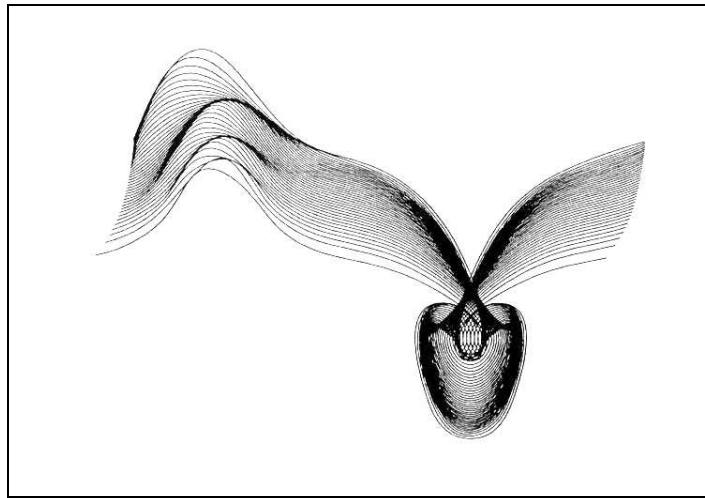


Abbildung 13: Phasenkurven eines Doppelpendels (periodische Lösung)

3.2.1.2 Nichtglatte dynamische Systeme

Das Problem der Rasselschwingungen in Schaltgetrieben kam über Industrie Probleme an meinen Lehrstuhl und löste sehr schnell umfangreiche Grundlagenforschungen für Mehrkörpersysteme mit reibungsfreien Stößen aus. Es zeigte sich nämlich, dass derartige Systeme sich als diskrete Abbildungen (Punktabbildungen) darstellen lassen und zwar auch für den allgemeinen Mehrkörperfall. Für diesen allgemeinen Fall existierten auch damals schon Verfahren der nichtlinearen Dynamik, die man für die Beschreibung solcher Rasselschwingungen mit Hilfe von Ljapunov-Exponenten, von Bifurkationsdiagrammen und von chaotischen Attraktoren heranziehen konnte. Dies waren im Wesentlichen die Schwerpunkte der Arbeiten von KARAGIANNIS (1989) und von KUNERT (1992). Beide modellierten die im Allgemeinen sehr irregulär verlaufenden Rasselercheinungen auch mit stochastischen Verfahren auf der Basis von Markov-Ketten, von Zellabbildungen und von Monte Carlo Simulationen. KUNERT leitete mit einigen guten Ideen die äquivalenten Fokker-Planck-Gleichungen für das Rasselproblem her und löste sie auch. Die anfängliche Hoffnung, mit stochastischen Verfahren Rechenzeiten zu sparen, erwies sich leider als falsch. Ganz im Gegenteil, der Einsatz solcher Verfahren scheiterte bereits für kleine Systeme an den explodierenden Rechenzeiten. Eine Interpretation der Darstellungen der nichtlinearen Rasseldynamik im Verhältnis zur Praxis brachte dagegen einige nicht schulmäßigen Aussagen. Beispielsweise kann Rasseln in einigen Parameterbereichen einen positiven Ljapunov-Exponenten aufweisen und damit „instabil“ werden. Dies bedeutet jedoch niemals eine Instabilität des Getriebesystems, sondern lediglich irregulär anstatt periodisch auftretende Zahnkontakte.

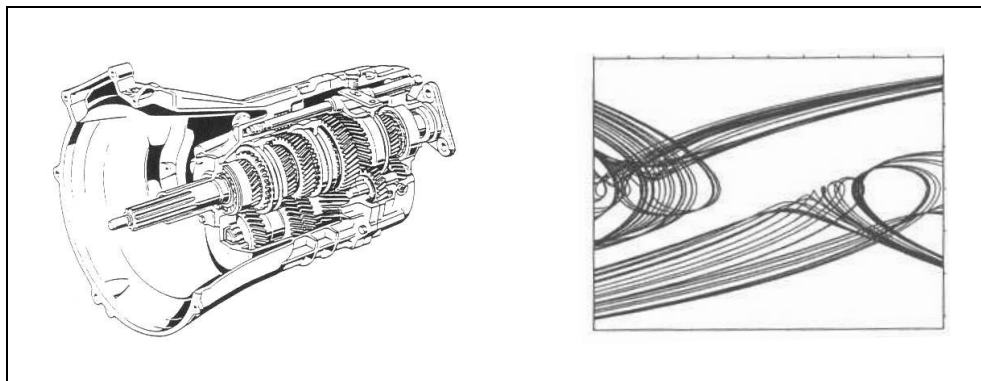


Abbildung 14: Rassel-Chaos im Getriebe

Die Beschäftigung mit nichtglatte Erscheinungen in der Dynamik mechanischer

Systeme begann gleich zu Beginn meiner Berufung, als ich im Labor des Lehrstuhls unter vielen anderen Hinterlassenschaften auch einen Spielzeugspecht vorfand, der ganz im Gegensatz zu den Gepflogenheiten meines Vorgängers noch nicht als mathematisches Modell existierte. Wir machten uns mit viel Optimismus daran, der uns auch trotz des immer größeren Zeitaufwandes zur Modellierung dieses Spechts erhalten blieb. Das Modell enthielt empirische Komponenten, da wir damals Stöße mit Reibung nicht beschreiben konnten, aber es entstand das erste Modell mit zeitvarianten Strukturen, wie wir damals sagten, und es hatte ungeheure Folgen. Erstens wuchs in mir die Überzeugung, dass es möglich sein sollte, für beliebige Mehrkörpersysteme mit vielen Kontakten in Form von Stößen, von Reibung mit Haften und Gleiten und von Kontakt/Nicht-Kontakt eine einheitliche Theorie zu formulieren, die solche Prozesse konsistent beschreibt, und zweitens hieß das, dass wir weiter suchen mussten und zwar auf der Basis großer praktischer Anwendungsfälle, die auch für die Industrie von Bedeutung waren.

Ein erster Schritt waren die Rasselprobleme und die damit einhergehende Theorie. Ein zweiter wichtiger Schritt war mit zwei industriellen Problemen gegeben, die die Dämpfung von Turbinenschaufeln und den Landevorgang elastischer Flugzeuge betrafen. Die Dämpfung von Turbinenschaufeln geschieht häufig mit in etwa parabolisch gebogenen Stahlblechelementen, die man zwischen die Schaufelfüße hängt, und die bei Schwingungen einen Dämpfeffekt durch Trockenreibung erzeugen. In den beiden Kontakten mit den Schaufelfüßen kann jeweils Haften oder Gleiten auftreten, was vier Kombinationsmöglichkeiten und somit vier Kontaktkonfigurationen mit vier unterschiedlichen Sätzen von Bewegungsgleichungen ergibt. Die Übergänge wurden damals noch einzeln abgefragt, was wegen der geringen Zahl an Freiheitsgraden möglich war. HAJEK (1990) erstellte die zugehörige Theorie und verglich sie erfolgreich mit Messungen aus der Industrie. Der Landevorgang elastischer Flugzeuge als zweiter Schritt betraf hauptsächlich die Fahrwerksdämpfung bei harten Landungen und damit die Auslegung des Dämpfers, der bei Flugzeugen sehr kompliziert ist und über vierzig Unstetigkeiten enthält. Es war deshalb schlechterdings nicht mehr möglich, über vierzig Gleichungskonfigurationen hinzuschreiben. Aus diesem Grunde wurde eine neue Gleichungsstruktur entwickelt und erfolgreich umgesetzt. Dies lief außerhalb von Dissertationen, war aber für die weitere Entwicklung enorm wichtig.

Denn der dritte Schritt war die überaus wichtige und fruchtbare Zusammenarbeit mit Professor Panagiotopoulos aus Thessaloniki, der zusammen mit Moreau aus Montpellier die mathematischen Grundlagen für nichtglatte mechanische Systeme geschaffen hatte. In vielen Diskussionen entstand das weitere Vorgehen und die Übertragung der prinzipiellen Ideen auf die Mehrkörpertheorie. An vorder-

ster Front haben sich hierbei Glocker und Seyffertth verdient gemacht, die nicht nur zum richtigen Zeitpunkt einfach da waren, sondern auch mit ihrem außergewöhnlichen Verständnis für neue und komplizierte Probleme in dieses schwierige Gebiet sofort mit viel Engagement einstiegen. SEYFFERTH (1994) wendete die neuen Verfahren im Rahmen des SFB 336 auf Probleme der Montageautomatisierung mit Robotern an, wo etwa bei Bolzen-Loch-Problemen viele unstetige Kontaktprozesse auftreten, die dann hier zum ersten Mal vollständig und in sich widerspruchsfrei gelöst wurden. Viele experimentelle Verifikationen bestätigten den Wert der neuen Theorie. GLOCKER (1995) entwickelte die erste Reibstoßtheorie in der Mehrkörperdynamik und legte dabei ein mathematisches Fundament für alle nachfolgenden Arbeiten, auch im Bereich der allgemeinen nichtglaten Systeme. Seine Dissertation und später dann auch seine Habilitation bilden unverzichtbare Meilensteine in der Entwicklung einer geschlossenen Theorie für Mehrkörpersysteme mit einseitigen Bindungen bzw. Kontakten. Die Habilitation ist als Buch im Springer-Verlag erschienen (GLOCKER 2001).

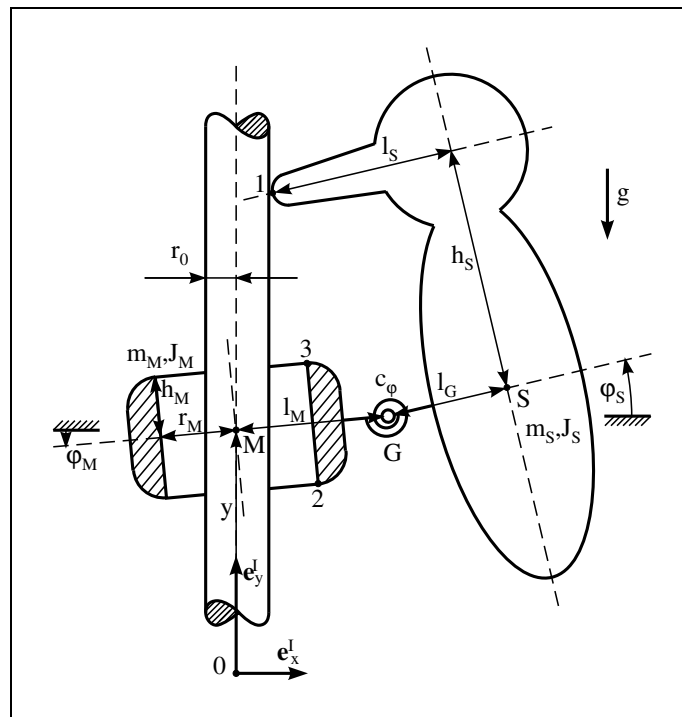


Abbildung 15: Der „nichtglatte“ Spielzeugspecht

Damit war der Forschungsbedarf nicht erschöpft. Die Reibstoßtheorie von Glocker wurde von BEITELSCHMIDT (1999) in überzeugender Weise verifiziert und durch einige sehr schöne physikalische Interpretationen ergänzt. Kernstück seiner Arbeit war die Entwicklung einer Wurfmaschine, mit der man sehr präzise

die Anfangsgeschwindigkeiten einstellen und den zu werfenden Körper in wenigen Millisekunden loslassen konnte. Die dafür notwendige Regelung musste mit erheblichem Aufwand entwickelt und realisiert werden. Mit den über 600 Messungen von Beitelschmidt kann die neue Reibstoßtheorie als gesichert gelten.

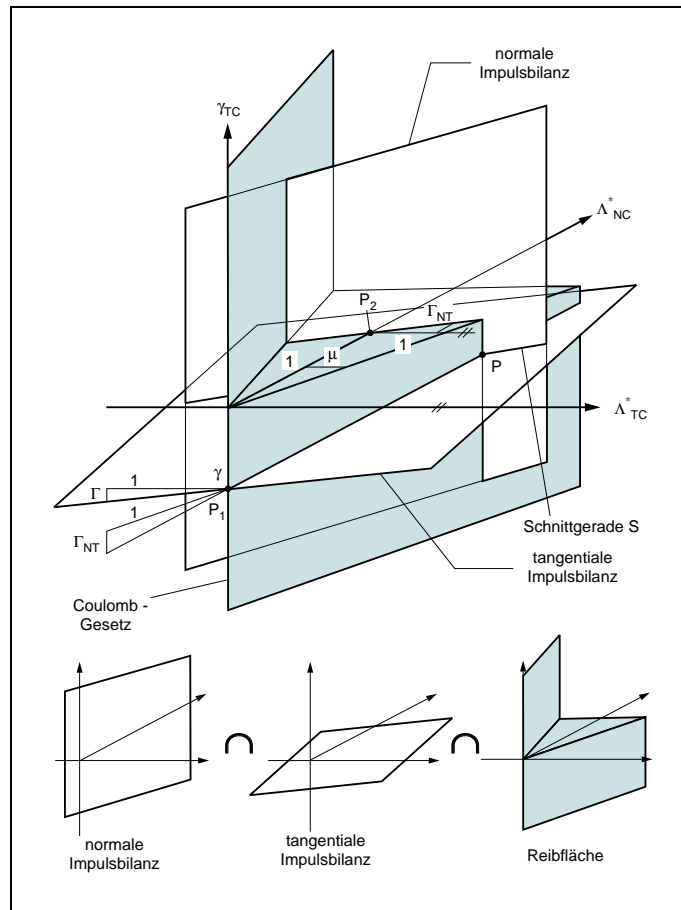


Abbildung 16: Struktur eines reibungsbehafteten Stoßes

Von Anfang an ergaben sich für die Lösung des Systems von Bewegungsgleichungen mit bilateralen und unilateralen Bindungsgleichungen große Rechenzeitprobleme, an denen bis heute geforscht wird. Der Weg, durch Umwandlung der im Allgemeinen großen Komplementaritätsprobleme in nichtlineare algebraische Gleichungen mittels Komplementaritätsfunktionen erwies sich als nicht erfolgreich, zumindest was die Rechenzeiten anbelangt. Dies hat WÖSLE (1997) zweifelsfrei in seiner Dissertation herausgefunden. Der Ersatz der Ungleichungen beim Komplementaritätsproblem durch algebraische Gleichungen führt zu so großen Gleichungsstrukturen, dass damit aus Sicht der Rechenzeit nichts gewonnen ist. Der von STIEGELMEYER (2001) eingeschlagene Weg der Time-

Stepping-Methoden erweist sich als wesentlich viel versprechender und wird auch weiter verfolgt. Es zeigt sich, dass bei der Lösung des Komplementaritätsproblems dann nur noch der Anfang eines Kontakt ereignisses interpoliert werden muss, während das Ende eines Kontakt ereignisses vom Verfahren automatisch richtig behandelt wird.

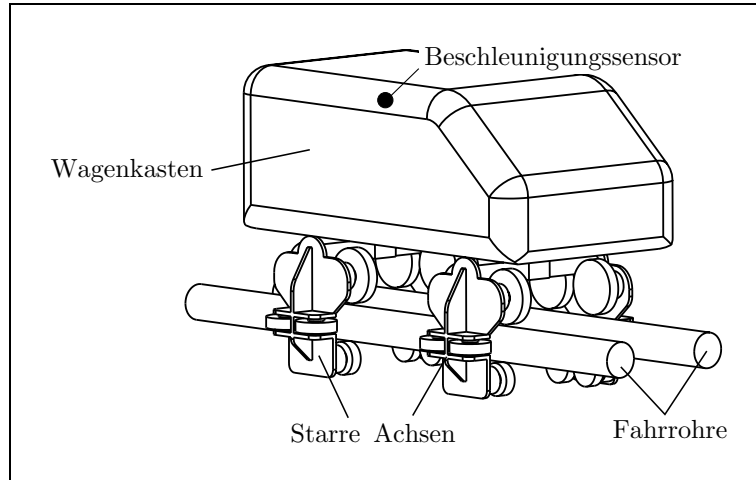


Abbildung 17: Achterbahn mit Stößen und Reibung

Inzwischen hat sich auch anderweitig herausgestellt, dass die mathematischen Grundlagen der nichtglatten Systeme in sehr vielen Bereichen der Physik hervorragende Modellierungen erlauben. Ein Beispiel hierfür bietet die Hydraulik, wo bei Komponenten wie Ventilen oder bei Kavitation viele Kennlinien auftreten, die besser und für die Rechenzeiten ungleich effektiver durch Ecken-Kennlinien, also durch Komplementaritäten, approximiert werden. BORCHSENIUS (2003) hat ein solches Verfahren in allgemeiner Form entwickelt und in einen Computer-Code umgesetzt. Gegenüber kommerziellen Rechenprogrammen für die Hydraulik konnte an mehreren großen industriellen Beispielen mit einigen hundert hydraulischen Freiheitsgraden eine Rechenzeiterparnis um drei bis vier Größenordnungen erreicht werden (Faktor 1000 bis 10 000).

Die Arbeiten für nichtlineare Systeme gehen natürlich auch auf internationaler Ebene weiter, vor allem in Frankreich. Diskrete dynamische Systeme mit endlich vielen Freiheitsgraden beherrscht man recht gut, wobei es, wie oben bereits bemerkt, durchaus noch Verbesserungsbedarf in der Numerik gibt. Diese Aussage gilt auch für kontinuumsmechanische Probleme mit statischem Charakter. Dynamische Probleme der Kontinuumsmechanik führen statt der gewöhnlichen Maß-differentialinklusionen auf partielle, deren mathematische Basis praktisch nicht

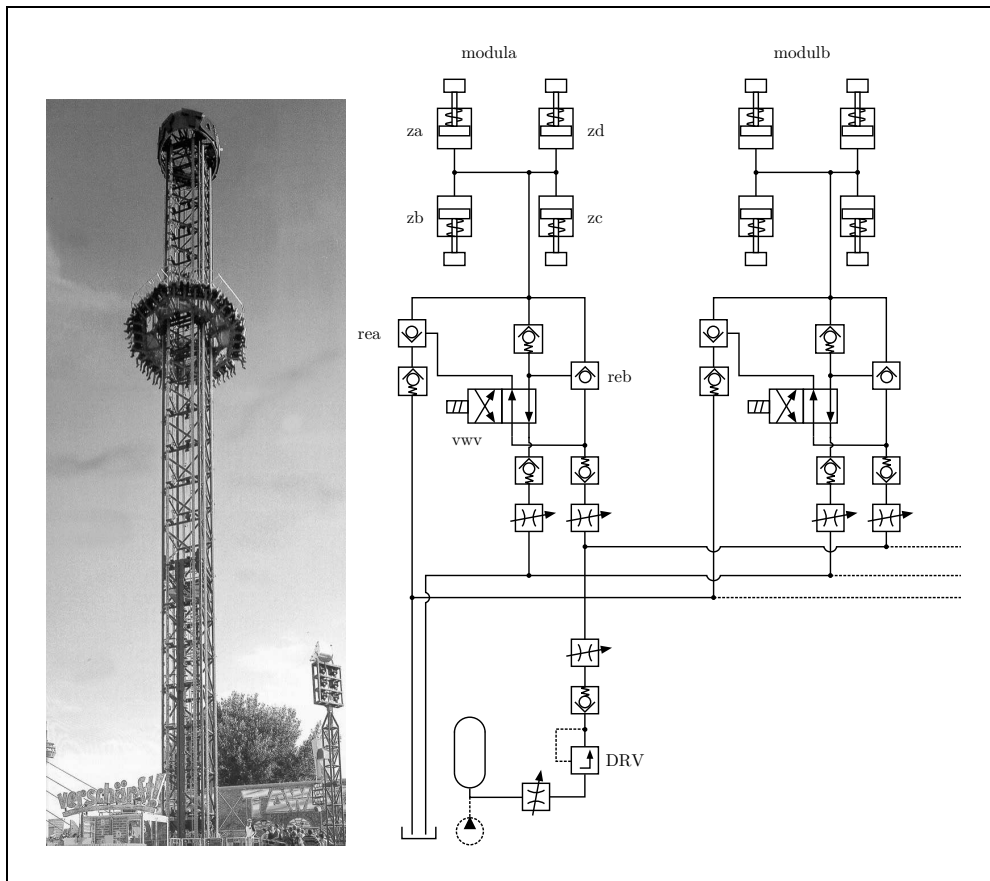


Abbildung 18: Nichtglatte Hydraulik (Freifallturm)

vorhanden ist. Für eindimensionale Kontinua gibt es einen viel versprechenden Ansatz von FUNK (2004), dessen Dissertation von den Problemen bei der Modellierung des van- Doorne-Schubgliederbandes (VDT-Bosch) ausgeht, das bei Beginn seiner Arbeit an die Grenzen einer nicht-glaten Modellierung stieß. Die Idee besteht darin, das VDT- Band als eindimensionales Kontinuum mit verteilten Unstetigkeiten zu modellieren, was FUNK erfolgreich mit lokalen Orts- und Zeitdiskretisierungen in Verbindung mit einem Zustandsautomaten anging. Das dabei auftretende Komplementaritätsproblem besitzt keine Standardform. Kontinuumssysteme mit verteilten Unstetigkeiten dürften auch in Zukunft große Forschungsfelder eröffnen.

3.2.1.3 Biegeeweiche Kopplungen in Mehrkörpersystemen

Motiviert durch Schwingungsprobleme bei Web- und Wirkmaschinen griff

ich ein Thema der Grundlagenforschung auf, das sich mit der Dynamik von durchlaufenden Fäden beschäftigt. Die Fragestellung besteht darin, dass Fäden in solchen Maschinen mit hoher Geschwindigkeit durch sich bewegende Nadeln und Führungen laufen und damit ein kompliziertes Schwingungsproblem eines eindimensionalen Kontinuums mit zeitlich und örtlich nicht konstanten Randbedingungen definieren. Dies wurde in verallgemeinerter Form theoretisch und experimentell von WEGMANN (2001) betrachtet. Seine Lösungen verband er mit dem allgemeinen Formalismus für Mehrkörpersysteme. Damit ist eine Basis für weitere Forschungen geschaffen, da mit diesem Typus von Problemen ein ganzer Bereich eröffnet werden könnte.

3.2.1.4 Mechatronik

Der Lehrstuhl B für Mechanik war seit seiner Gründung durch Professor Magnus 1966 stets auch mit Problemen der Regelung und der Optimierung befasst, allerdings meistens in anwendungsorientierter Form. Es gab jedoch auch einige grundlegende Arbeiten. So diejenige von VOLKER HADWICH (1998), die die Mehrkörpertheorie und die Maxwell'sche Elektrodynamik zusammenführte, um daraus eine vereinheitlichte Theorie für mechatronische Systeme herzuleiten. Diese Bemühungen werden bis heute auf nationaler und internationaler Ebene weitergeführt. Mit der Optimierung großer Systeme beschäftigt sich CHRISTIAN ROSS (1991). Basierend auf dem Dreisäulenkonzept von Eschenauer werden besonders Systemreduktionen mit Hilfe von Modal- und Lanczos-Transformationen sowie die Einbindung umfangreicher Nebenbedingungen erforscht. Hierzu gehört auch die langwierige analytische Ermittlung von Gradienten für die Optimierung. Die erarbeiteten Verfahren wurden auf große Probleme der Luft- und Raumfahrt, wie den Airbusflügel und einen Satelliten, angewendet.

Zu den mechatronischen Arbeiten gehören alle Aktivitäten für die Robotik und für die Laufmaschinen. Hier wurden teilweise grundlegende neue Regelungskonzepte auf der Basis neurologischer und neurobiologischer Forschungsergebnisse entwickelt und in unseren Laufmaschinen auch erfolgreich realisiert. Ich werde darauf bei den Robotik- und Laufmaschinenarbeiten näher eingehen.

3.2.1.5 Simulation, Numerik und Programmierung

Die Ausrichtung des Lehrstuhls bestand stets darin, auch die mehr anwendungsorientierten Promotionen nach Möglichkeit von der Theorie her selbst aufzubauen, die dabei entstehenden mathematischen Systeme zunächst einer

sorgfältigen strukturellen Prüfung zu unterziehen, um mögliche Lösungen oder Teillösungen sichtbar zu machen, und dann erst die Umsetzung, auch fast immer eigenständig ohne Einsatz kommerzieller Programme, selbst vorzunehmen. Dies ist unmittelbar einzusehen, denn würde sich ein Grundlagenlehrstuhl auf dem Niveau bereits vorhandener kommerzieller Rechenprogramme bewegen, so liefe er der Zeit hinterher und könnte wohl schwerlich einen wissenschaftlichen Führungsanspruch begründen. Vor dem Hintergrund dieser Forderung zusammen mit einer erfolgreichen theoretischen Grundlagenforschung muss man sich auch um numerische Verfahren, die beispielsweise für nicht-glatte Systeme noch in den Kinderschuhen stecken, selbst kümmern, man muss dies mit Hilfe moderner Verfahren wie das objektorientierte Programmieren in ein Programm umsetzen und schließlich damit Simulationen durchführen. All das macht und machte zeitlich sehr oft den größten Anteil aller Promotionen aus, mit moderner Semantik kann man das „Computational Mechanics“ nennen, ich meine, es ist im Zeitalter der Computer eher eine Selbstverständlichkeit. Rechner sind natürlich hervorragende Hilfsmittel zur Bewältigung komplizierter Problemlösungen und großer Datenmengen, sie sind auch hilfreich für die Entwicklung neuer Verfahren unter Einsatz numerischer Experimente, aber sie ersetzen nicht das eigene Nachdenken über die Probleme.

Ein Beispiel für die Numerik stellt die Promotion von ANDREAS STIEGELMEYR (2001) dar, die bereits oben diskutiert wurde. Die meisten der hier aufgeführten Arbeiten über Grundlagen und einige über Anwendungen enthalten Kapitel über numerische Aspekte. Trotzdem muss man den Lehrstuhl vom Ort der numerischen Mathematik her gesehen sicherlich mehr auf der Anwender- als auf der Grundlagenseite einordnen. Gleiches gilt natürlich für die Programmierung, wo immer wieder auf neu entwickelte Verfahren der Informatik zurückgegriffen wurde, wie zuletzt auf die noch recht jungen Methoden der objektorientierten Programmierung. Die Ideen hierfür sind zwar schon dreißig Jahre alt, eine Umsetzungsmöglichkeit („für alle“) ergab sich erst in den neunziger Jahren mit den OOA-, OOD- und OMT- Techniken. Hier setzt auch die Dissertation von JOACHIM POST (2002) an, der eine konsequent objektorientierte Software für allgemeine Antriebsstränge entwickelt und erfolgreich am Beispiel eines Ravigneaux-Getriebes von ZF erprobt. Das Programmsystem DYNAS ist seitdem vielfach von der Industrie benutzt.

Im Zusammenhang mit Simulation verdient eine andere Aktivität des Lehrstuhls eine Erwähnung. Seit Ende der neunziger Jahre ist die „Kosimulation“ in Diskussion. Darunter versteht man das Zusammenfügen mehrerer großer Programmblöcke in ein Gesamtsystem. Wir haben uns hier schon sehr früh engagiert und vor Jah-

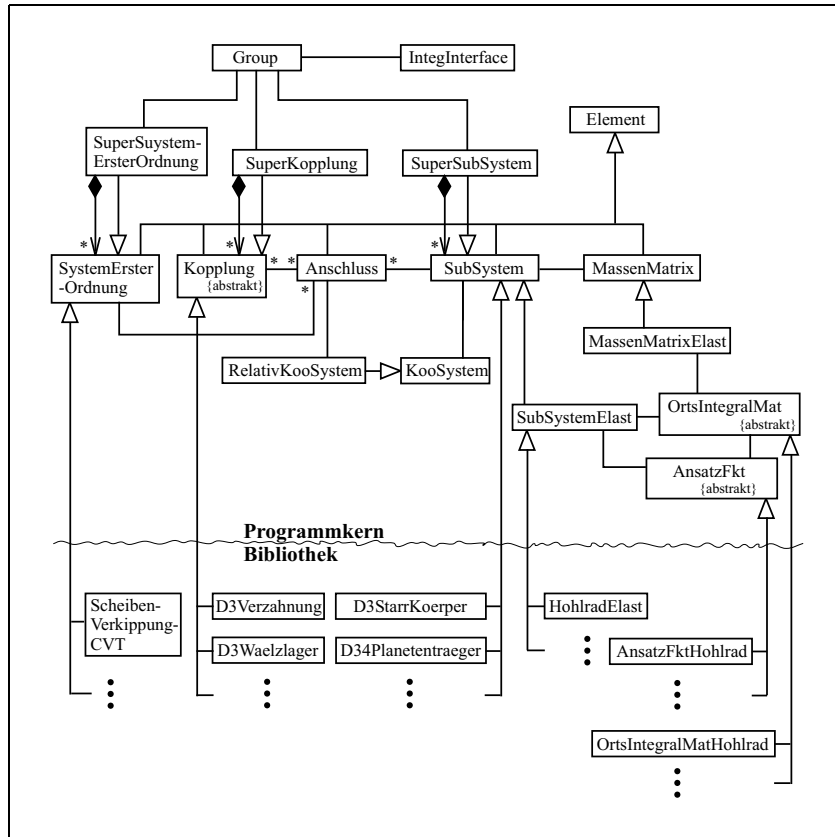


Abbildung 19: Klassenmodell für die Bibliothekselemente

ren entschieden, Kosimulationen nur auf der Basis eines zentral organisierten Integrationssystems und nicht über eine Synchronisation getrennt laufender Integrationsroutinen abzuwickeln, eine Entscheidung, die sich inzwischen als richtig herausgestellt hat. Im Rahmen der FVV-Aktivitäten sind erfolgreich Kosimulationen mit DYNAS (Antriebsstrangdynamik), HYSIM (Hydraulik) und XKETSIM (Rollenketten) durchgeführt worden, derzeit werden die CVT-Ketten-Programme zusätzlich eingebunden. Jedes dieser Einzelprogramme (alle in C++) ist sehr umfangreich, nach den alten FORTRAN-Maßen etwa zwischen 50 000 und 100 000 Statements groß.

3.2.1.6 Versuchstechnik und Messungen

Die Mehrzahl der Promotionen beinhaltet auch Versuche und den damit notwendigen Versuchsaufbau, die Sensorik, die Messtechnik, die Messdatenauswertung und schließlich die Messdatenbeurteilung. Versuche sind manchmal

genau so wenig realitätsnah wie Theorien, daher ist auf beiden Seiten eine Überprüfung immer angeraten. Die damit verbundene Arbeit kommt in den meisten Dissertationen nicht zum Ausdruck, sondern wird, wie im Falle der Programmerstellung auch, nur nebenbei erwähnt. Der Lehrstuhl verfügt traditionell über eine hervorragende Werkstatt und ein ebenso gutes Labor, auf die Doktoranden immer zurückgreifen können. Dies kommt allen zugute, wird aber nicht immer beschrieben.

Ausnahmen sind die rein experimentellen Arbeiten wie etwa diejenigen von KELL (1999) und von BEITELSCHMIDT(1999), wobei letztere schon wieder einen großen Anteil Theorie enthält. BRANDL (2000) hatte im Rahmen eines DFG-Vorhabens die Aufgabe, eine Reibmaschine zu entwerfen, zu bauen und zu testen, um Reibkennlinien zu messen. Dies ist zwar ein altes Problem, aber messtechnisch häufig schlecht gelöst. Herr Brandl entschloss sich für einen selbsterregten Schwinger, der entsprechende Messungen in hoher Qualität zulässt. Seitdem wird diese Maschine für eigene und fremde Standardmessungen für Trockenreibung eingesetzt.

3.2.2 Anwendungsforschung für Maschinen und Antriebe

Grundlagenarbeiten in den Ingenieurwissenschaften sind stets vor dem Hintergrund zu sehen, dass Ingenieurwissenschaften Umsetzungswissenschaften sind, und dass auch die Grundlagen hierzu einen Beitrag leisten müssen, selbst wenn sie in die Nähe der Naturerkenntnis der Naturwissenschaften geraten. Dies war immer Ziel des Lehrstuhls, auch bei den nicht-glatten Systemen, die einige allgemeine Erkenntnisse beinhalten. Der Spagat von der reinen Theorie bis zur praktischen Anwendung ist für die Ingenieurwissenschaften deshalb so wichtig, weil mit großen Umsetzungsspannen auch große Wettbewerbsvorteile verbunden sind.

3.2.2.1 Rotordynamik

Die Grundlagenarbeiten im Bereich der starren und elastischen Mehrkörpersysteme stellten teilweise eine Weiterführung der Forschungen meines Vorgängers, Professor Kurt Magnus, dar, der mit seinen Schülern dieses Thema bereits sehr früh aufgegriffen hatte. Die damaligen Oberassistenten Hartmut Bremer und Heinz Ulbrich, heute Professoren, waren seine Schüler. Ulbrich hatte ein anderes, mehr anwendungsorientiertes Gebiet bearbeitet, nämlich die Dynamik und Regelung von Rotorsystemen. Dies schloss umfangreiche experimentelle

Arbeiten im Labor ein, zu denen Herr Ulbrich aufgrund seines Werdeganges ein intensives Verhältnis hatte. Auch er promovierte wie Bremer bei Magnus und habilitierte sich bei mir. Seine Habilitationsschrift (ULBRICH 1986) erwies sich als Ursprung vieler Nachfolgearbeiten, die auch praktische industrielle Probleme mit einschlossen.

So untersuchte FÜRST (1990) die Schwingungsregelung von Rotoren mit Hilfe von aktiven Lagern, deren Außenringe jeweils mit zwei schräg gestellten elektromagnetisch angetriebenen Stellmotoren bewegt werden konnten. Die dabei erzielten Ergebnisse in Bezug auf die möglichen Schwingungsreduzierungen waren sehr überzeugend. Eine Weiterführung dieser Idee verfolgte ALTHAUS (1991) mit einer Kammer-Membran-Anordnung, die wiederum auf den Außenring eines der Rotorlager wirkte und so eine sehr effektive Regelung möglich machte. Hierbei überzeugte besonders die kompakte Bauweise des Stellgliedes, das vier Membran-Kammern besitzt, die hydraulisch angesteuert werden. Frau ZHENG (1993) aus der Volksrepublik China entwickelte in einer weiteren Arbeit eine lernende und damit anpassungsfähige Regelung, die Unzulänglichkeiten des Modells, Ungenauigkeiten der Messungen und langsame Änderungen des Rotors im Betrieb ausgleichen konnte.

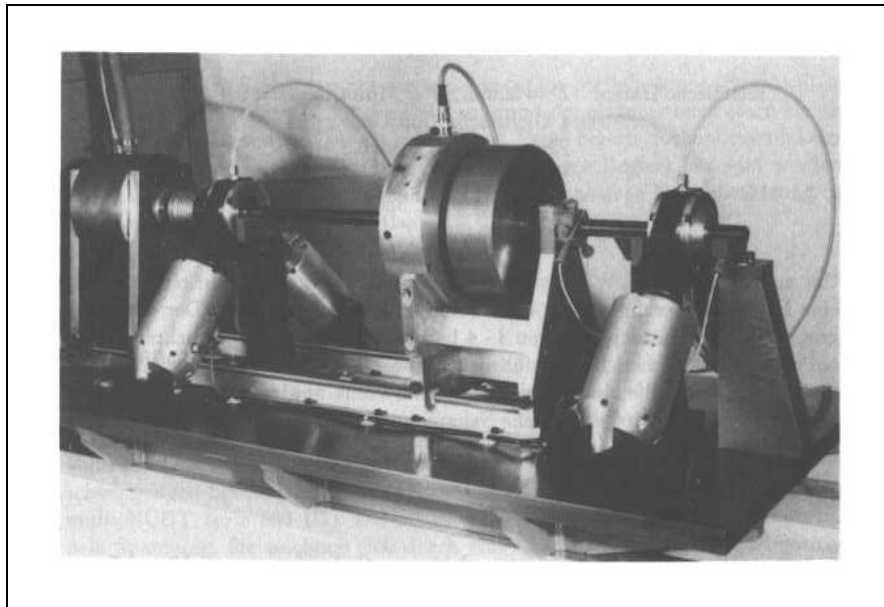


Abbildung 20: Rotorversuchsstand

Statt der einfachen Gleitlager untersuchte Herr SANTOS (1993) aus Brasilien

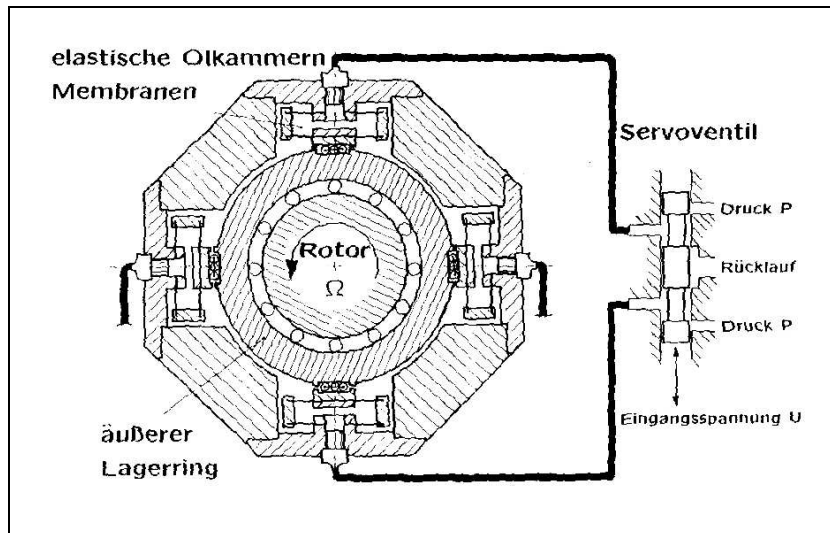


Abbildung 21: Hydraulisches Stellglied für die Regelung von Rotoren

eine Rotorregelung mit Kippsegmentlagern, die sowohl theoretisch als auch experimentell erheblich schwieriger zu behandeln sind als die normalen Gleitlager. Die Ansteuerung der Kippsegment-Teile erfolgte mit dem von ALTHAUS entwickelten hydraulisch angesteuerten Membran-Kammersystem. Er löste diese Aufgabe mit Bravour und mit überzeugenden Ergebnissen. Auf der Basis dieser Forschungen verbesserte JÄGER (1994) das System von ALTHAUS besonders im Hinblick auf die Auslegung und Realisierung der hydraulischen Regelung. Eine neue Idee verfolgte dann Herr WU (1999) aus der Volksrepublik China. Es sollte versucht werden, die Biegeschwingungen eines Rotors durch direktes Einspritzen von Hochdrucköl in ein Gleitlager zu beeinflussen. Dies ist prinzipiell möglich, sogar sehr gut möglich, erfordert aber einen großen Aufwand für die damit notwendige Druckölversorgung. Die dahinter stehende Hoffnung, dies mit Mikropumpen erreichen zu können, hat sich bis heute leider nicht erfüllt.

Die Arbeit von DIRSCHMID (1995) greift systematisch die nichtlinearen Probleme bei Rotoren auf, so wie sie damals in der Triebwerksindustrie von Bedeutung und Interesse waren. Strömungsbedingte Nichtlinearitäten stellen die selbsterregten Schwingungen in Gleitlagern dar, sie finden sich in Quetschöldämpfern und in Dichtungen. Wälzlager mit Spiel ergeben nichtlineare Effekte genauso wie Haft-Gleit-Erscheinungen in Presssitzen oder in Keilwellen-Verbindungen. Schaufelanstreifen stellt ein gefährliches Problem dar, was beherrscht werden muss, um Schädigungen zu vermeiden. Schließlich können auch geometrische Nichtlinearitäten

wie die unter dem Begriff „Misalignment“ zusammengefassten Ungenauigkeiten zu Schwingungsanregungen führen.

3.2.2.2 Antriebstechnik und Getriebe

Das größte Anwendungsfeld am Lehrstuhl war und ist die Antriebstechnik mit besonderer Betonung der Drehmomentenwandler, also der Getriebe. Die Gründe hierfür liegen zunächst in der starken Position der deutschen Automobilbranche und damit verbunden in den vielen industriellen Forschungsaktivitäten, an die man anknüpfen kann. Der zweite Grund ist der Maschinenbau der TU-München, der seit Niemanns Zeiten eine weltweit starke Stellung im Getriebebau besitzt, womit sich Ansprech- und Kooperationspartner ergeben. Schwerpunkt aller Aktivitäten sind die Fahrzeugantriebe, es werden jedoch auch Antriebsprobleme des allgemeinen Maschinenbaus bearbeitet.

Die allererste Promotion nach meinem Wechsel von der Industrie zur Hochschule beschäftigte sich bereits mit einem Antriebsstrang von BMW, dessen Schwingungen reduziert werden sollten. GOSDIN (1985) modellierte den Gesamtstrang, reduzierte das Modell so weit, dass es optimierungsfähig wurde, definierte mehrere Maße für Schwingungen und Geräusche und führte einen pareto-optimalen Prozess durch, dessen Ergebnisse unmittelbar umgesetzt wurden und eine Schwingungsreduktion um nahezu 20 % brachten. Eine Verallgemeinerung in Richtung Dynamik-Modelle stellte dann die Habilitationsschrift von BRANDL (1988) vor, die sich mit allgemeinen Modellen der Maschinendynamik auf der Basis der Mehrkörpertheorie befasste. Eine Arbeit, die zwar in die Gesamthematik Fahrzeugtechnik passt, sich aber mit Lenksystemen befasst, kam von der DLR. SENGEL (1989) untersucht verschiedene Lenksysteme zur Reduktion des Schwimmwinkels, er erstellt verschiedene Fahrzeugmodelle und entwirft einige für das Problem geeignete Regelungen.

Die Stufenautomaten wurden zum ersten Mal im Rahmen einer Doktorarbeit aufgegriffen, die bei BMW lief und von mir betreut wurde. Es ging dabei um rechnergestützte Dauererprobungen für Automatikgetriebe, die im Wesentlichen aus Funktionserprobungen und aus den eigentlichen Dauererprobungen bestehen. Um dies auf einem Prüfstand möglichst realitätsnah durchführen zu können, muss man das Fahrer- und Streckenverhalten abbilden, was nur auf empirische Weise geschehen kann. Die Arbeit BRANDT (1993) widmet sich diesem Thema und entwickelt geeignete computergestützte Algorithmen. Viel später griffen wir das Thema der Modellierung von Stufenautomaten auf, und zwar im Rahmen eines

Projektes der bayerischen Forschungstiftung. HAJ-FRAJ (2001) entwickelt zunächst Modelle von einer bis dahin nicht gekannten Modellierungstiefe, von der Mechanik über die Hydraulik bis hin zur Elektronik, und nutzt diese Modelle dann als Basis für verschiedene Reglerentwürfe. Die Modellierung der Lamellenkupplungen, die Regelung der Schaltvorgänge und der programmtechnische Aufbau sind in eindrucksvoller Weise Dissertationen für sich, vieles davon wurde von der beteiligten Industrie übernommen. Erwähnenswert ist beispielsweise die Idee, die nicht mehr beeinflussbaren Schwingungen nach den Synchronpunkt mit Hilfe der Bellmannschen Gleichungen auf diesen zurück zu projizieren und dann mit einer Art Synchronpunkt-Impuls vollständig zu beseitigen.

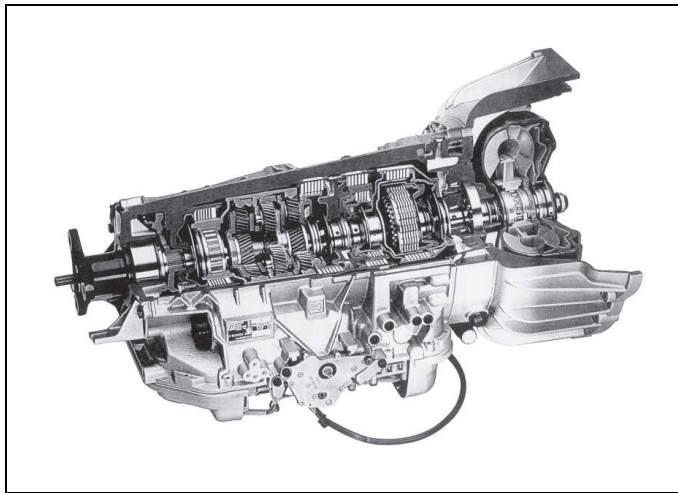


Abbildung 22: Modelle von Automatikgetrieben (Beispiel 5HP24 von ZF)

Dieser Weg der Gesamtstrang- und der Gesamtgetriebemodellierung wurde stets von Forschungsarbeiten begleitet, die sich intensiver um die einzelnen Komponenten eines Stranges kümmerten. Einen wichtigen Ausgangspunkt stellt dabei die Habilitation von KÜCÜKAY (1987) dar, der bereits bei meinem Vorgänger mit der Dynamik eines einstufigen Getriebes promoviert hatte. In seiner Habilitation verallgemeinerte er dies für beliebige Getriebesysteme und setzte dabei auch Maßstäbe für alle zukünftigen Arbeiten in diesem Bereich, und zwar besonders in Bezug auf die Erstellung mechanischer Ersatzmodelle und ihre mathematische Darstellung. Er untersuchte auch Rasselerscheinungen in Handschaltgetriebe, ein damals sehr aktuelles Thema. Vor diesem Hintergrund ist dann auch die Dissertation von LACHENMAYR (1988) zu sehen, die Planetengetriebe mit Elastizitätseinflüssen untersucht und dabei als typisches Beispiel ein Industriegetriebe aus dem Anlagenbau heranzieht. Die von ihm betrachteten Planetengetriebe mit elastischen Hohlrädern erfordern sehr aufwendige Modelle auf der theoreti-

schen Grundlage der Mehrkörpersysteme mit linear-elastischen Bauteilen, für die Bremer die Basis geschaffen hatte. Trotz dieser aufwendigen Verfahren konnte Theorie und Praxis in gute Übereinstimmung gebracht werden.

Eine weitere Verfeinerungsstufe stellen die Dissertationen von DENNIN (1997) und von WANDERER (1994) dar. DENNIN befasst sich mit optimalen Zahnkorrekturen und widmet sich einer immer wieder diskutierten Frage, ob man nämlich bei der Modellierung von Getrieben mit einer konstanten und fixierten Eingriffslinie für die Verzahnung rechnen darf, oder ob man alle nichtlinearen Effekte, die zu einer zeitvarianten Verschiebung dieser Linie führen, berücksichtigen muss. Hierzu entwickelt er dreidimensionale Verzahnungsmodelle und führt nichtlineare kinematische Effekte ein. Seine Ergebnisse in Form von modellbasierten Verbesserungen der Zahnkorrekturen und der Aussage, dass in den meisten praktischen Fällen eine konstante Eingriffslinie ausreicht, konnten durch Messungen bestätigt werden. WANDERER (1994) greift ein praktisches Thema auf, nämlich die Modellierung der Zahnsteifigkeit mit Hilfe von FE-Modellen.

Das Rasseln in Getrieben tritt immer in spielbehafteten Getriebestufen ohne Belastung auf wie sie etwa in Handschaltgetrieben aber auch in großen Getrieben des Anlagenbaus vorkommen. Einige der damit befassten Dissertationen wurden bereits genannt, diejenigen von KÜCÜKAY, KUNERT und KARAGIANNIS. In der damals stattfindenden Diskussion mit der Industrie ging es häufig um Geräusche und die Beeinflussung solcher Geräusche durch das Getriebegehäuse. SOLFRANK (1991) widmete sich diesem Thema. Für die interne Rasseldynamik benutzte er die am Lehrstuhl vorhandenen Theorien und Rechenprogramme, das Gehäuseverhalten wurde mit Hilfe einer experimentellen Modalanalyse erfasst, damals ein sehr aufwendiges Verfahren. Die Ergebnisse bestätigten die Vermutung, dass die für das Rasseln verwendeten Maße, wie beispielsweise der statistische Mittelwert der Stoßimpulse im spielbehafteten Zahneingriff, durch das Getriebegehäuse zwar verzerrt werden, qualitativ aber die gleichen Aussagen liefern.

Mit den von der FVV und der MTU finanzierten Arbeiten von FRITZER (1992) und PRESTL (1991) kam mit den Steuertrieben eine neue Antriebsstrangkomponente hinzu. Beide entwickeln eine in sich konsistente Theorie für derartige Steuersysteme, indem sie die einzelnen Bauteile und ihre Modellierung betrachten und sie dann mit einem Mehrkörperalgorithmus zusammenfügen. Beide betrachten auch Unstetigkeiten in Form von Kraftelementen mit Spiel. Fritzers Schwerpunkt liegt mehr im Automobilbereich, Prestls Schwerpunkt bei den Großdieselmotoren. Mit Messungen konnten beide Arbeiten überzeugend verifiziert werden. Prestl konnte zeigen, dass beim Hämmern in Rädertrieben mit Spiel die Wahrscheinlich-

keiten für Stoßzeiten und für Stoßfolgezeiten sehr gut durch Gammafunktionen approximiert werden können. Im Übrigen war die in den beiden Dissertationen entwickelte Theorie lange Zeit Grundlage für einen Programmcode GETSPI für die Dynamik von Getrieben mit Spiel.

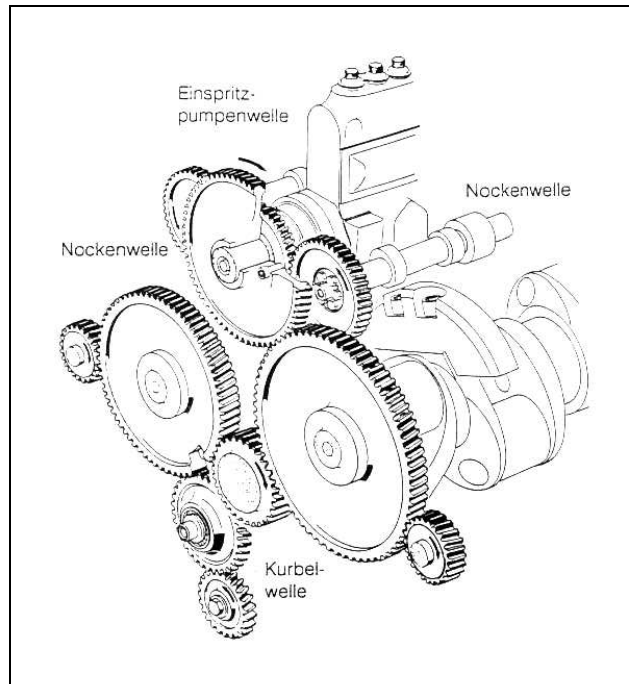


Abbildung 23: Steuertriebe von Zahnrädern (Hämmern)

Die Arbeit von Prestl war Ausgangspunkt weiterer Bemühungen um eine möglichst realitätsnahe Modellierung von Antriebssträngen im Allgemeinen und von Steuertrieben im Besonderen. Der Grund bestand in der Tatsache, dass ein sehr guter Vergleich mit den bei MTU durchgeführten Messungen nur durch eine nicht zufrieden stellende Anpassung einiger Zahnsteifigkeiten möglich war. Ich hatte mir vorgenommen, dies in weiteren Dissertationen zu klären. Eine erste Verbesserung brachte die Arbeit von BRAUN (1999), der die Steifigkeitsreduktion in Steuertrieben infolge von Presssitzen untersuchte. Einige der Zahnräder im Steuertrieb der MTU waren aufgepresst. Dies ergab einen Einfluss auf die speziellen Steifigkeitswerte fast um den Faktor 2. Dennoch war auch dies noch nicht zufrieden stellend. Die letzte Korrektur wurde erfolgreich von WEIDEMANN (1999) in seiner Habilitationsschrift gefunden, und dies ist besonders interessant in Bezug auf Modellierungsfragen im Allgemeinen. Er griff nämlich das Beispiel des bereits von Prestl und Braun betrachteten Großdieselmotors wieder auf und ergänzte die

entsprechenden Modelle durch Biegeschwingungen der Nockenwelle. Dies glaubten wir wegen der vielfachen Lagerung der Nockenwelle vernachlässigen zu dürfen, was sich als falsch erwies. Die zusätzliche Modellierung von Presssitzen und der Nockenwellen-Biegeschwingungen machte eine Anpassung der Zahnsteifigkeiten nicht mehr notwendig. Versuch und Theorie stimmten überein.

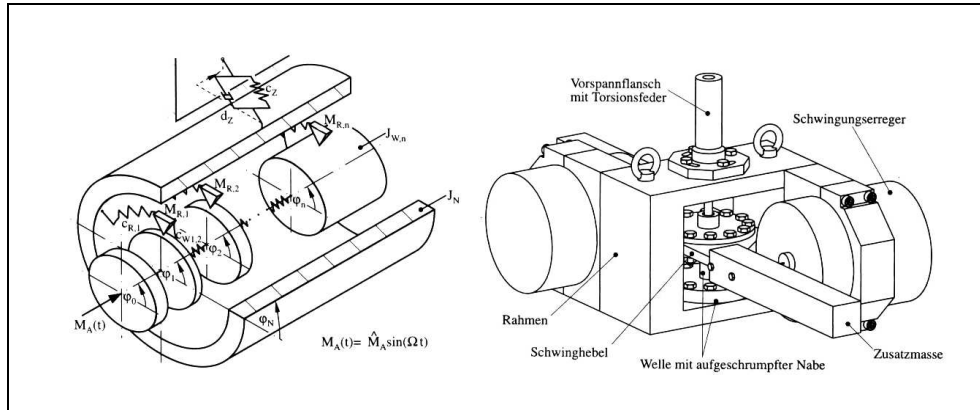


Abbildung 24: Theorie und Experiment für Pressverbindungen

Die Forschungen über Steuerketten wurden durch weitere FVV-Vorhaben systematisch vorangetrieben. FRITZ (1998) und KELL (1999) entwickelten theoretisch und experimentell zum ersten Mal sehr detaillierte und gleichzeitig sehr realitätsnahe Modelle für die Beschreibung von Rollenketten der verschiedenen Bauarten, wobei diese Arbeiten besonders stark von den Grundlagenarbeiten am Lehrstuhl profitierten. Alle Kettenglieder mit jeweils drei Freiheitsgraden, Elastizitäten, Ölfilme, Spiele und die genaue Ein- und Auslaufkinematik von Kette und Kettenrädern werden berücksichtigt. Spanner und Gleitschienen beeinflussen die Dynamik nachhaltig. Das dabei entstandene Programm ist heute Standard in der Industrie. Alle Rechnungen wurden mit den Messungen von KELL verifiziert, der mit einem aufwendigen Messsystem die Kettenkräfte direkt am Kettenelement ermittelte. Die Weiterführung dieser Arbeiten übernahm dann ANDREAS HÖSL (2005), der die vorhandenen Theorien und Verfahren um viele wichtige Komponenten und auch Kettenarten erweiterte. Er betrachtete die Zahnketten und den Kettentyp von Borg Warner, er entwickelte Verfahren für elastische Gleitschienen und erstellte eine modular aufgebaute Bibliothek für Kettenspanner. Die Dynamik von Kettenspannern war über Jahre hinaus ein Dauerthema, das heute durch die Möglichkeiten dieser Bibliothek, die nämlich fast jede Konfiguration aus Elementen aufbauen kann, weitgehend entschärft ist.

Es lag nahe, diese Arbeiten auf die Ketten der CVT-Umschlingungsgetriebe aus-

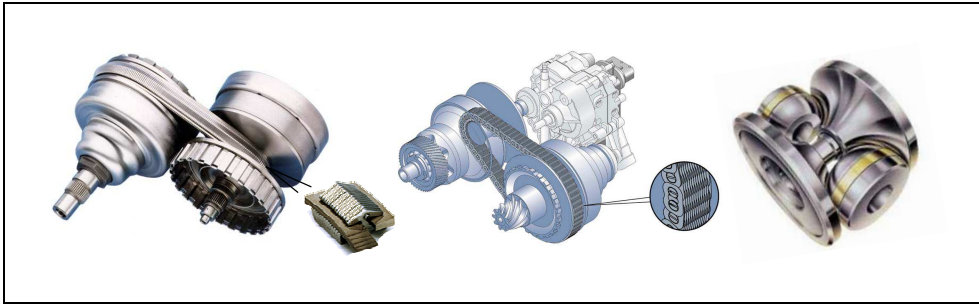


Abbildung 25: CVT-Varianten

zudehnen. Dies geschah bereits zu einem Zeitpunkt, als daran noch niemand dachte, was dem Lehrstuhl bis heute einen Wettbewerbsvorteil verschafft. Die in den letzten zehn Jahren entstandenen Verfahren sind immer noch weltweit führend, wenn inzwischen auch andere Institute und Firmen nachziehen. SRNIK (1999) begann Mitte der neunziger Jahre, ein ebenes Modell für die PIV-Kette, System Reimers, zu entwickeln (Die PIV-Kette wird inzwischen von LUK hergestellt. Daher heißt sie heute auch LUK-Kette.). Auch hier spielte die Grundlagen-substanz des Lehrstuhls in Form der starren und elastischen Mehrkörpersysteme mit ein- und zweiseitigen Bindungen eine ganz wesentliche Rolle. Eine typische Kette mit Wiegedruck-Bolzen besitzt 60-70 Kettenelemente und entsprechende Wiegedruck-Bolzen für die Verbindung der Elemente. Dies entspricht im ebenen Fall 180 -210 Freiheitsgrade und im Umschlingungsbogen der Scheiben jeweils 2 Scheibenkontakte für jeden Wiegedruckbolzen. Die Kettenelemente bestehen aus mehreren Laschen, die über die geteilten Wiegedruckbolzen mit dem nächsten Element verbunden sind. Dies stellt eine Art Gleitlagerkontakt dar. Die detaillierte Kontaktmechanik ist entscheidend für eine realitätsnahe Berechnung der Kettenkräfte und schließlich des Wirkungsgrades. Ein- und Auslauf der Kette in den Scheiben beeinflussen die Dynamik nachhaltig. Modelle dieser Art bewegen sich auch heute noch an der Grenze des Machbaren. Das von SRNIK entwickelte Modell konnte durch viele Industrierversuche verifiziert werden. Es wurde auch vielfach für Auslegungsarbeiten herangezogen.

CVT-Ketten laufen zwar näherungsweise in einer Ebene, es gibt jedoch immer aufgrund von kinematischen Effekten, aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten von Los- und Festscheibe und schließlich aufgrund von Bauungenauigkeiten auch ein zumindest zeitlich begrenztes Auswandern aus dieser Ebene. Die damit verbundenen Amplituden sind sehr klein, die dadurch hervorgerufenen Kräfteschwankungen jedoch sehr groß. Das hängt mit der Empfindlichkeit der Kontaktprozesse zusammen, weshalb ja auch die Scheiben immer elastisch modelliert

werden müssen. MARTIN SEDLMAYR (2003) widmet sich diesen Problemen im Rahmen eines Sonderforschungsbereiches der DFG. Er entwickelt die erste, auch bis heute erste, dreidimensionale Theorie für CVT-Ketten des Systems Reimers und gelangt damit zu deutlich realitätsnäheren Ergebnissen als beim zweidimensionalen Modell. Die dahinter stehende Theorie und das daraus entwickelte Rechenprogramm sind sehr aufwendig, bestätigen aber mit den Resultaten für Kräfte und Wirkungsgrade die Notwendigkeit dreidimensionaler Modelle. Zum ersten Mal konnten damit auch Auslegungsstudien unternommen werden, die zu neuen Erkenntnissen über die einzelnen Parametereinflüsse bei solchen Ketten führten. Schon kleinste Änderungen der Geometrien in den Kontaktbereichen können die Laufqualität einer Kette deutlich verbessern.

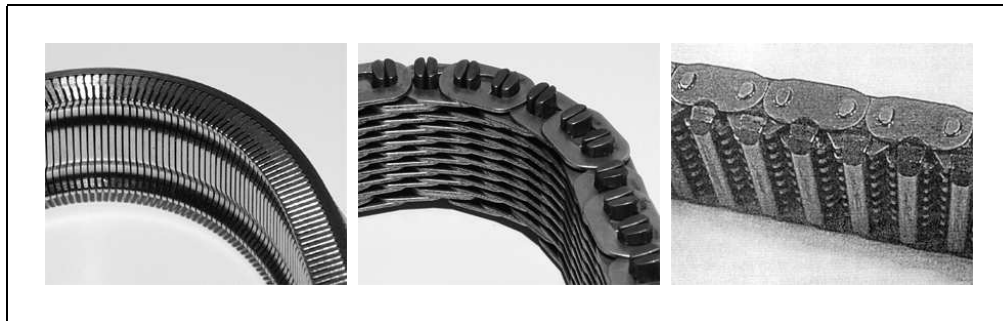


Abbildung 26: Unterschiedliche Bänder und Ketten

Vor diesem und dem Hintergrund der bislang erzielten Erfolge trauten wir uns, angestoßen durch ein industrielles Problem, an die Modellierung der CVT-Bänder heran, die noch einmal eine Stufe komplizierter als die LUK-Ketten sind. Die Schubglieder- oder van-Doorne-Bänder besitzen 300-600 Glieder, von Bändern mit bis zu 9-12 Lagen gehalten, was pro Glied 5 Kontakte ergibt. Zusätzlich haben wir die Kontakte zwischen den Bandlagen. Im ebenen Fall haben wir 3 Freiheitsgrade und 3 Kontakte pro Glied, zusätzlich die Bandkontakte. Das Problem dieser Bänder aus Sicht der Dynamik besteht in einem überaus großen Frequenzbereich, der von einigen Hertz des Gesamtsystems bis zu einigen hundert Kilo-Hertz für die Longitudinaldynamik des Bandes reicht. Eine direkte Modellierung mit Starrkörper- Kontakten gelang Ende der neunziger Jahre nicht, auch nicht mit einer Approximation der Kontaktgesetze durch glatte Funktionen. Die Numerik war noch unterentwickelt und damit die Rechenzeiten nicht realisierbar. Die Situation ist heute bereits besser. BULLINGER (2005) näherte die Bewegung des Bandes durch kontinuierliche Ansätze im Sinne von Galerkin an und erzielte damit in Verbindung mit den Verfeinerungseffekten von hierarchischen Basen gute Ergebnisse, die inzwischen auch industriell umgesetzt werden. Die Arbeit wurde begleitet von FUNK (2004), der von der Idee ausging, Bauelemente mit

vielen nichtglatten Unstetigkeiten durch Kontinuumsselemente mit verteilten Unstetigkeiten anzunähern. Darauf wurde bereits bei den Grundlagen hingewiesen. FUNK eröffnete damit ein neues Forschungsfeld, das noch sehr viele Forschungsaktivitäten, besonders auch im Grundlagenbereich, notwendig machen wird.

Nachdem das Gebiet der Antriebstechnik und der Getriebe stets ein Erfolg versprechendes Anknüpfungsthema für die Industrie war, bemühte ich mich, die Modellpalette im Bereich der Getriebe vollständig zu halten. Es existierten immer wieder aktualisierte Modelle für Zahnrad- und Umschlingungsgetriebe, ebenso für Stufenautomaten. Dazu existierten sehr detaillierte Modelle für den gesamten Antriebsstrang. Vervollständigt wurde dies durch Modelle für Cyclo-, Harmonic-Drive- und für Toroidgetriebe. REN (1991), ein sehr fähiger chinesischer Doktorand aus Beijing, modellierte im Rahmen eines Drittmittelvertrags mit der Firma Cyclo-Getriebebau in der Nähe von München ein Getriebe dieser Bauart, das allerdings mehr in Japan als in Deutschland eingesetzt wird. REN entwickelte ein aussagekräftiges Modell, baute einen Versuchsstand auf und verglich seine Theorie sehr erfolgreich mit Messungen. Auf dieser Basis konnte er umfangreiche Parameterstudien für die Firma Cyclo durchführen.

Ein völlig neues Modell für Harmonic-Drive-Getriebe entstand während der Arbeiten für den Rohrkrabber (ROSSMANN 1998), auf den noch eingegangen wird. Bei allen Laufmaschinen pflegten wir immer eine enge Zusammenarbeit mit den Herstellern von Motoren und Getrieben, so auch mit Harmonic Drive in Limburg/Lahn. Der Rohrkrabber MORITZ wird mit einem Konzept geregelt, das sich auf die Methode der Feedback Linearization gründet und daher einige Schätzalgorithmen (Observer) benötigt, unter anderen auch für die Getriebereibung, die bei den Harmonic Drive Getrieben besonders groß ist. In diesem Zusammenhang entstand das Modell mit Einsatz von Komplementaritätsverfahren, was sich als besonders effektiv erwies. Wir entwickelten die Theorie, Harmonic Drive führte Messungen an einer Serie durch, beides stimmte sehr gut überein, und MORITZ lief damit hervorragend.

Die Beschäftigung mit CVT-Umschlingungsgetrieben legte natürlich den Gedanken nahe, auch andere CVT-Systeme zu untersuchen, wovon es viele gibt. Zu den wichtigen Varianten gehören die Toroidgetriebe, die in der Automobilindustrie bereits einige Fahrtests absolviert haben. BORK (2000) griff dieses Thema auf, das aus Sicht der Mechanik besonders anspruchsvolle Probleme der Kinematik, der Kinetik, der Kontakt-Fluidmechanik und der Regelung einschließt. Dementsprechend sind adäquate Modelle aufwendig und kompliziert. Herr Bork meisterte das mit Bravour, wobei er aus einer japanischen Veröffentlichung das Toroidge-

triebe von Nissan vollständig rekonstruieren konnte, um dann deren Messungen mit seiner Theorie zu vergleichen, mit Erfolg. Im Übrigen auch ein Beispiel dafür, wie man durch geschickten Einsatz von Simulationen aus unvollständigen Daten und Zeichnungen den unbekannten Rest herausholen kann.

3.2.3 Maschinen, Geräte und Transport

Im Rahmen von Industriekooperationen und der damit einhergehenden Drittmittel- Finanzierung wurden auch immer wieder Probleme der Dynamik und Schwingungsprobleme von Maschinen und Fahrzeugen untersucht, allerdings mit der Einschränkung, dass die Themen unmittelbar in das Grundlagenkonzept des Lehrstuhls als „conditio sine qua non“ hineinpassen mussten. Vor diesem Hintergrund sind einige bemerkenswerte Arbeiten zu nennen, die wie die anderen auch Impulse in Richtung neuer Grundlagen-Entwicklungen geben konnten.

Seit den achtziger Jahren gab es für lange Zeit eine Kooperation mit MTU, eine Firma, die Triebwerke und Großdieselmotoren herstellt. Über mehrere Drittmittelprojekte konnten einige für die Weiterentwicklung des Lehrstuhls sehr wichtige Forschungsprojekte durchgeführt werden. So betrachtet BEHNKE (1991) das Problem des Dichtungsflatterns in Flugzeugtriebwerken, das aus der Gas-Struktur-Wechselwirkung im Kammersystem der Labyrinthdichtungen herrührt und einige der Struktureigenschwingungen anregen kann. Dichtungsflattern ist in der Grundstruktur eine selbsterregte Schwingung, die ihre Energie aus der Strömung bezieht, wobei die Dichtlippen als eine Art Schalter wirken. Mit steigender Leistung bei gleichzeitig sinkendem Gewicht moderner Triebwerke werden solche Erscheinungen verstärkt.

Verdichterinstabilitäten und das daraus resultierende Pumpen stellen sehr gefährliche dynamische Prozesse in Triebwerken dar, die zum Verlust des Triebwerks führen können. Aufgrund immer größerer Druckverhältnisse pro Verdichterstufe wird der stabile Betriebsbereich eingeschränkt, was eine zuverlässige Regelung des Pumpgrenzenabstandes notwendig macht. Das Auftreten von Pumpen ist stets mit der Erzeugung eines Stoßsystems entgegen der Strömungsrichtung und damit mit sehr großen Schaufelbelastungen verbunden. Eine allgemeine Beschreibung des Problems ist kompliziert und natürlich nur numerisch machbar. Daher versucht FRODL (1995) in seiner Dissertation einen vereinfachten und somit stark approximativen Weg zu gehen, der dennoch eine erste und ungefähr realistische Abschätzung der Schaufellasten im Pumpfall möglich macht.

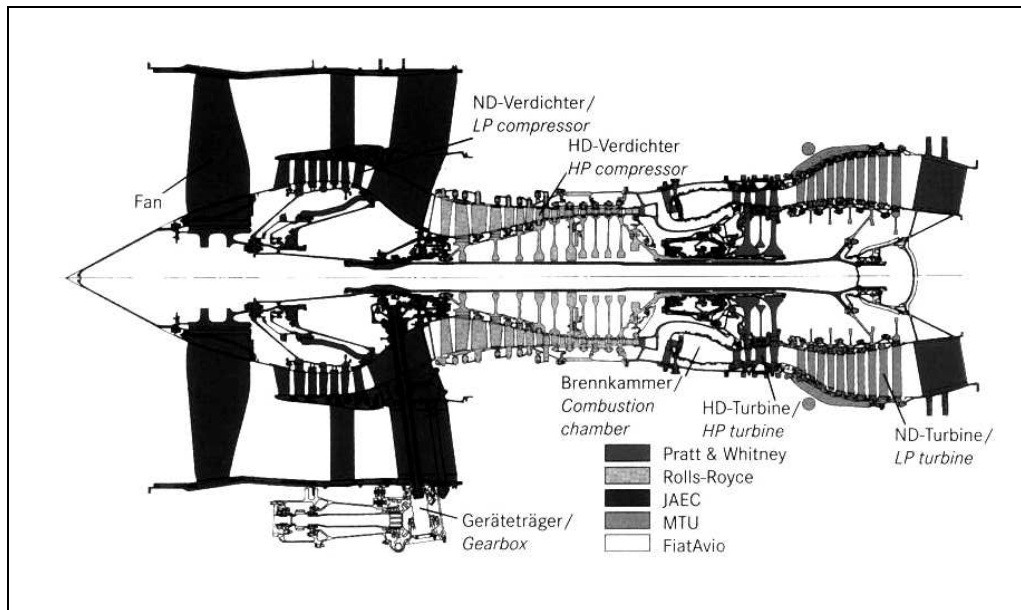


Abbildung 27: MTU Strahltriebwerk V2500

Triebwerke besitzen heute sehr große Wartungsintervalle (mean time between failure, MTBF), die man dennoch flexibler gestalten möchte. Einen Ansatz dazu verfolgt BAUER (1997) in seiner Dissertation. Die Idee besteht darin, die während der Flüge millionenfach gemessenen Daten eines Triebwerks für die Fehlersuche heranzuziehen, wobei zwei Probleme auftreten. Erstens sind die meisten dynamischen Vorgänge im Triebwerk nichtlinear, und zweitens sind nichtlineare Effekte von Parameterfehlern im Triebwerk niemals eindeutig nur einem bestimmten Fehler zuzuordnen. Die Merkmalsextraktion aus solchen Daten hängt von außerordentlich vielen Einflüssen ab, von diagnostischen Indikatoren, von den Interpolationsmethoden, von der Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit des Systems, von der dahinter stehenden Simulation, um nur einige zu nennen. Herr Bauer schafft es dennoch, überzeugende Diagnoseergebnisse mit Genauigkeiten unterhalb 5% für ein reales Triebwerk vorzustellen.

Zu den Arbeiten im Triebwerksbereich muss auch die Promotion von HAJEK (1990) gerechnet werden, die jedoch wegen ihrer großen Bedeutung für die Entwicklung der nicht-glatten Systeme bereits bei den Grundlagen genannt wurde.

Mit der Dissertation von BREUER (1995) verlassen wir den Triebwerksbereich und kommen zum Auto zurück, dessen Fahrsicherheit, besonders im Hinblick auf

extreme und nichtlineare Fahrzustände, durch eine Regelung der Radmomente deutlich verbessert werden kann. Auf der Basis eines ebenen Zweispurmodells mit 9 und eines räumlichen Zweispurmodells mit 18 Freiheitsgraden entwickelt Breuer eine Regelung für die Radmomente, wobei die Identifizierung der Reibung im Reifenlatsch eine besondere Leistung darstellt. Messungen bei BMW bestätigten die theoretischen Konzepte. HILLENBRAND (1993) war damals Mitarbeiter bei der Deutschen Bundesbahn. Er untersuchte theoretisch und experimentell die Fahrwerksauslegung für den ICE.

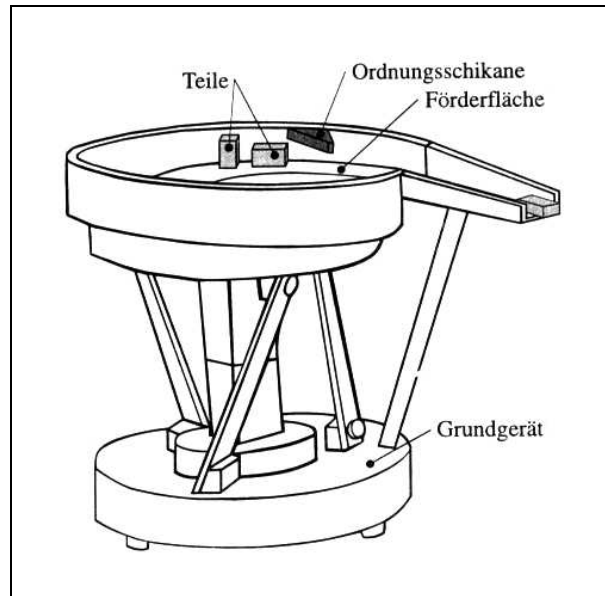


Abbildung 28: Vibrationsförderer mit Ordnungsschikane

Unmittelbar industriebestimmte Arbeiten waren diejenigen von FRANZ (1993), WAGNER (2000) und WOLFSTEINER (1999). Die ersten beiden wurden über Drittmittel der beteiligten Firmen und die letzte im Rahmen des SFB 336 finanziert. FRANZ beschäftigte sich mit Hochpräzisionswaagen wie sie in der pharmazeutischen Industrie eingesetzt werden. Auflösungen von einigen Millionen sind keine Seltenheit, was entsprechende mechanische Modelle bis in den Kilohertz-Bereich hinein und die dafür passende Regelung erfordert. Herr Franz entwickelte ein besonderes Verfahren, um die Auswirkungen von Bauungenauigkeiten, gegeben durch Standardmessungen der Baulose, auf die Amplituden-Frequenz-Funktion zu ermitteln. Die Arbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit der Firma Sartorius in Göttingen und mit dem Lehrstuhl für Regelungstechnik der TUM durchgeführt. Die Ergebnisse konnten unmittelbar eingesetzt werden.

Die Promotion WAGNER entstand aus einer Zusammenarbeit mit der Firma AEG. Es ging um die Stabilität, die Laufruhe und die dynamische Belastung von Waschmaschinen, ein anscheinend triviales Thema, das aber sehr schnell zur Spitzenforschung wurde, um die Probleme zu lösen. Es mussten nämlich für die Darstellung der dynamischen Vorgänge in der Maschine fast sämtliche Bauteile elastisch beschrieben werden, was FE-Methoden erforderte, an die zusätzlich für die Verbindungselemente und andere Bauteile starre Massen anzukoppeln waren. Die Ermittlung der dynamischen Lasten an bestimmten kritischen Stellen machte im Rahmen der Gesamtsimulation lokale Betrachtungen notwendig. Die Simulationen wurden ausnahmslos experimentell nachvollzogen, mit gutem Erfolg. Die kritischen Bauteile konnten verbessert ausgelegt werden.

Im Rahmen des SFB 336 wurde auch das Problem der Förderung kleiner Bauteile mit Rüttelförderern betrachtet, das für uns eine damals hochaktuelle und interessante Anwendung der nicht-glatte Mehrkörpertheorie darstellte. WOLFSTEINER ging das Problem theoretisch und experimentell an, wobei er nicht nur, wohl zum ersten Mal, den Rütteltransport vieler Bauteile gleichzeitig untersuchte, sondern auch umfangreiche Parameteruntersuchungen für existierende Rüttelsysteme durchführte, teilweise in engem Kontakt mit deutschen und schweizerischen Firmen. Theorie und Experiment stimmten gut überein, was auch den Vertrauenslevel in die erst neu entstandenen Verfahren für die nicht-glatte Dynamik an hob.

3.2.4 Robotik und Laufen

Einige wenige Forschungsarbeiten in der Robotik existierten bereits am Lehrstuhl, als ich ihn übernahm. Ich führte sie mit Hilfe von DFG-Mitteln weiter, und zwar mit Einzelvorhaben und im Rahmen von Sonderforschungsbereichen. Zusätzlich zu diesen Arbeiten entwickelten sich Aktivitäten für das technische Laufen, im wesentlichen ausgelöst durch das damals schon starke Engagement der Japaner und der Amerikaner in diesem Bereich und die sich daraus ergebende Herausforderung, etwas zu tun. Wir kooperierten mit einem Neurobiologen in Bielefeld (Prof. Cruse), der über eindrucksvolle und technisch umsetzbare Forschungsergebnisse über die Laufregelung von Insekten verfügte.

3.2.4.1 Robotik

Die Robotik im klassischen Sinn startete mit den beiden Arbeiten von

GEBLER (1987) und KLEEMANN (1989), die sich mit elastischen Robotern beschäftigten, und zwar mit der Modellbildung und der Regelung solcher Roboter, Gebler vom Schwerpunkt her mehr mit der Modellbildung, Kleemann mehr mit der Regelung. Beide führten die Forschungsarbeiten sowohl theoretisch als auch experimentell durch. Es waren im Übrigen die ersten größeren Anwendungen der von Bremer formulierten Theorie für elastische Mehrkörpersysteme. Die beiden Dissertationen bildeten für einige Zeit den Ausgangspunkt für die weitere Robotikforschung an meinem Lehrstuhl. In diesem Umfeld stellt die Arbeit von TÜRK (1990) eine Betreuungsarbeit für die DLR in Oberpfaffenhofen dar. Herr Türk untersucht darin ausschließlich Roboter mit rotatorischen Gelenken, für die sich meistens auch eine inverse Kinematik angeben lässt. Insbesondere entwickelt er für diese Klasse von Robotern eine einheitliche Betrachtungsweise und daraus folgernd einen einheitlichen Ansatz. Er wandte seine Verfahren auf den Industrieroboter Manutec R3 an.

Ein völlig neues Verfahren zur Bahnplanung entstand im Rahmen eines Einzelvorhabens der DFG über optimale Bahnplanung. Die Idee, sämtliche Roboter-Freiheitsgrade auf die Bahnkoordinaten zu transformieren, kommt in analoger Form in der Wiedereintrittstechnologie vor, wo um eine aero-thermodynamisch optimierte Bahn linearisiert und geregelt wird. Man kann zeigen, dass für eine ideal gefahrene Bahn jeder beliebige Roboter nur einen Freiheitsgrad besitzt und dass dann eine solche Transformation auf ein System nichtlinearer Differentialgleichungen führt, die sich analytisch lösen lassen, und zwar unabhängig von der Komplexität des Roboters. Die beiden Dissertationen von JOHANNI (1988) und von BLANCK (1988) greifen dieses Thema auf und behandeln es theoretisch und experimentell in überzeugender Weise. Besonders Johanni entwickelt ein neues Lösungsverfahren für derartige Probleme und setzt es in einen Computercode um. Die Arbeit fand weltweite Anerkennung.

Eine Art Fortsetzung stellt die Dissertation von RICHTER (1991) dar, deren Aufgabenstellung nicht nur das optimale Fahren vorgegebener Bahnen, sondern einmal ein schnelles optimales Fahren bei zusätzlich vorgegebenen Kräften entlang einer Bahn und zum anderen die Beherrschung langsamer Bewegungen mit Kraftregelung beinhaltet. Derartige Fragestellungen findet man bei vielen industriellen Roboteranwendungen. Der Roboter selbst ist dabei elastisch und muss in geeigneter Weise geregelt werden, um den Einfluss der Elastizitäten auszugleichen. Sein Verfahren war so genau, dass damit auch mit Hilfe einer Kraftmessung die äußere Gestalt eines Gegenstandes rekonstruiert werden konnte. Es war damals die erste Arbeit über die kombinierte Kraft- und Wegregelung von Robotern allgemeiner Bauart. Sie wurde international gewürdigt.

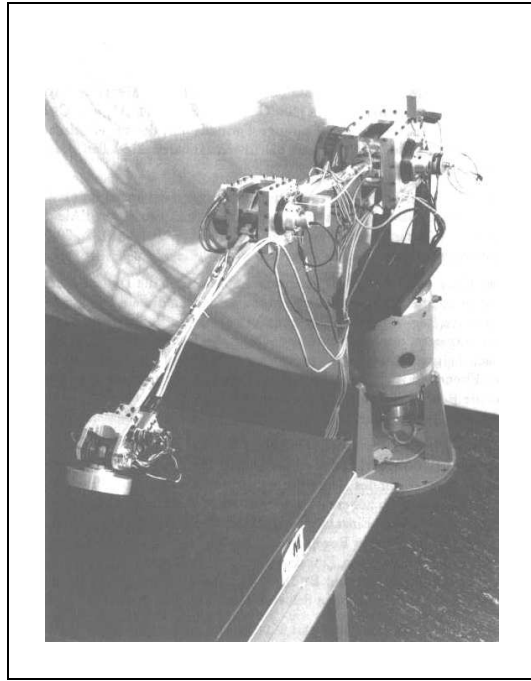


Abbildung 29: Elastischer Laborroboter

Einen nachhaltigen Schub in der Robotikforschung brachte der Sonderforschungsbereich 336 der DFG (Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung), der von den Kollegen Ehrlenspiel und Milberg ins Leben gerufen wurde und an dem außer mir die Kollegen Heinzl und Reichwald teilnahmen. Der Lehrstuhl B für Mechanik war darin stets mit 4-5 Mitarbeiter beteiligt, die Probleme der Montageautomatisierung mit Robotern untersuchten. Im Rahmen dieses SFB entstanden insgesamt 10 Dissertationen. Eines der Probleme bei der Dynamik von Montageprozessen besteht in den Kontaktvorgängen. Schon beim einfachen Bolzen-Loch-Problem ergeben sich über 40 verschiedene Kontaktkonfigurationen, die je nach Dynamik des Außensystems wirklich auch auftreten, wie experimentell gezeigt werden konnte. Dies erfordert aufwendige Modellierungen. Die hierzu notwendigen Verfahren der Mechanik und der Mathematik waren damals gerade im Entstehen begriffen und bei weitem noch nicht wirklich verstanden. Man kann dem SFB 336 daher bescheinigen, dass er, vielleicht nicht einmal geplant, einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der Theorie der Mehrkörpersysteme mit einseitigen Bindungen geleistet hat.

Der Name SEYFFERTH (1994) wurde bereits bei den Grundlagen über nichtglatte Mehrkörpersysteme genannt. Ohne ihn, der als erster das Lemke-Verfahren für

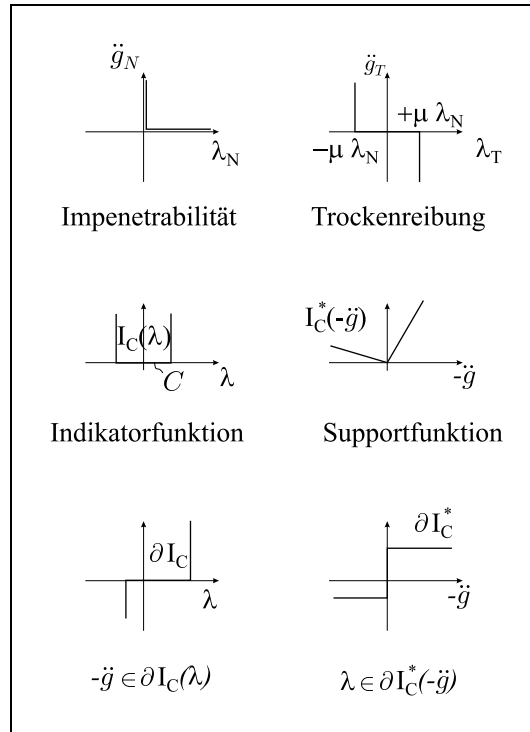


Abbildung 30: Kontaktgesetze

Komplementaritätsprobleme auch programmtechnisch umsetzte und damit die Voraussetzung für viele weitere Programme lieferte, und ohne GLOCKER (1995) wären viele Arbeiten im Sonderforschungsbereich 336 nicht so erfolgreich verlaufen. So betrachtet HENNER WAPENHANS (1994) Fügeprozesse mit Roboter, wofür er nicht nur geeignete Modelle und Experimente, sondern auch für das Fügen von Teilen entsprechende Regelungen entwickelt und realisiert. Er konzentriert sich dabei besonders auf das Bolzen-Loch-Problem, das vorher mit dem von ihm erreichten Detaillierungsgrad nicht gelöst wurde. Seine Schwerpunkte lagen dabei auf der optimalen Planung und Realisierung von Transportbewegungen und von Fugebahnen und schließlich auf der optimalen Kraftregelung von Fügeprozessen selbst. Die Dissertation von JOACHIM STEINLE (1996) führte diesen Ansatz weiter im Sinne einer verbesserten Anpassung der Lage- und Kraftregelung an die Besonderheiten eines Fügeprozesses, wobei die Regelung in besonders eindrucksvoller Weise in der Lage war, in sehr menschenähnlicher Weise bei ungünstiger Lage der Fügepartner den Fügevorgang durch gezielte Wiederholungen doch noch erfolgreich abzuwickeln. Er nutzte dabei Lage- und Kraftinformationen der Sensoren. Bei der experimentellen Realisierung kamen ihm seine besonderen Kenntnisse als Elektrotechniker zugute.

Alle genannten Arbeiten ebenso wie die weiteren Aktivitäten im SFB 336 hingen von guten Werten für die Roboterparameter ab. Aus diesem Grunde beschäftigte sich die Arbeit von JOSEF HÖLZL (1994) mit der Identifikation derartiger Parameter. Da diese Parameter in der aus den Bewegungsgleichungen herzuleitenden Informationsmatrix linear enthalten sind, konnten sie mit Hilfe einer Optimierung eindeutig ermittelt werden. Der Sinn dieser Optimierung besteht darin, die für die Identifikation notwendigen Trajektorien so auszuwählen, dass die unbekannten Parameter optimal „angeregt“ werden. Zu diesem Zweck muss man die Konditionzahl der Informationsmatrix in geeigneter Weise optimieren, was damals ein neuartiger Gedanke war. Die Methode funktioniert hervorragend und hat sich bestens bewährt. Eine weitere Arbeit über eine Komponente der Montageautomatisierung ergab sich mit den Problemen der Vibrationswendelförderer, die ein ideales und inzwischen fast klassisches Beispiel für die Anwendung der Mehrkörpertheorien mit einseitigen Bindungen darstellen. Die Dissertation von PETER WOLFSTEINER (1999) wurde deshalb in einem vorangegangenen Anwendungskapitel bereits genannt. Sie stellt eine zur damaligen Zeit nicht für möglich gehaltene Lösung zur Verfügung, die umfassend den bei Vibrationsförderern wirkenden stoßinduzierten Transport von kleinen Teilen beschreibt. Die Theorie konnte erfolgreich durch allerdings sehr aufwendige Experimente verifiziert werden.

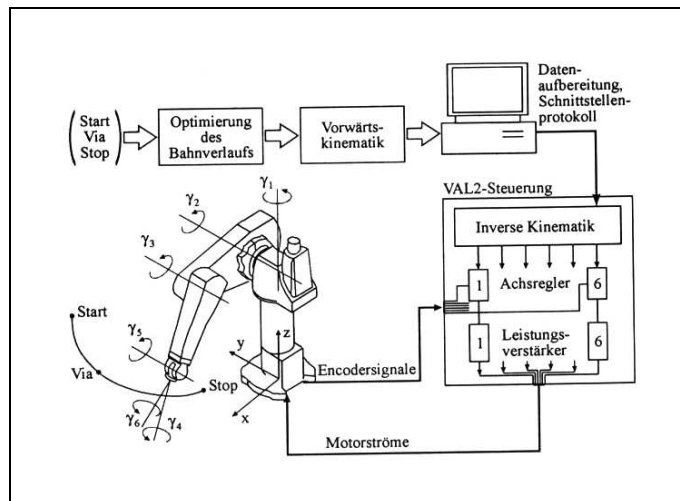


Abbildung 31: Übertragung der Bahnoptimierung auf die Robotersteuerung

Zwei zentrale Themen für den SFB 336 griffen die Arbeiten von THOMAS MEITINGER (1998) und von GÜNTHER PROKOP (1998) auf. Die automatisierte Montage ist bekanntlich durch zwei Aspekte charakterisiert, nämlich durch das dynamische Verhalten des Werkzeugs, in unserem Falle des Roboters, auf der

einen und durch das dynamische Verhalten des Fügeprozesses auf der anderen Seite. Beide Arbeiten versuchen dies zu vereinigen, wobei wie eigentlich immer eine geeignete Regelung unverzichtbar ist. MEITINGER betrachtet dabei starre und elastische Fügepartner, so das runde und eckige Bolzen-Loch-Problem im starren und Schnapper, Dicht- sowie Sicherungsringe im elastischen Fall. Im ersten Fall werden mengenwertige und im zweiten Fall kontinuierliche, wenn auch nicht glatte, Kraftgesetze eingesetzt. Die im elastischen Fall notwendigen Kraftgesetze ergeben sich dabei aus FEM-Analysen. Ein besonderes Verdienst der Arbeit von MEITINGER für die Forschungen am Lehrstuhl bestand in der Entwicklung der räumlichen Relativkinematik zwischen zwei Körpern auf der mathematischen Basis differentialgeometrischer Methoden. Alle theoretischen Verfahren wurden experimentell mit großem Erfolg verifiziert.

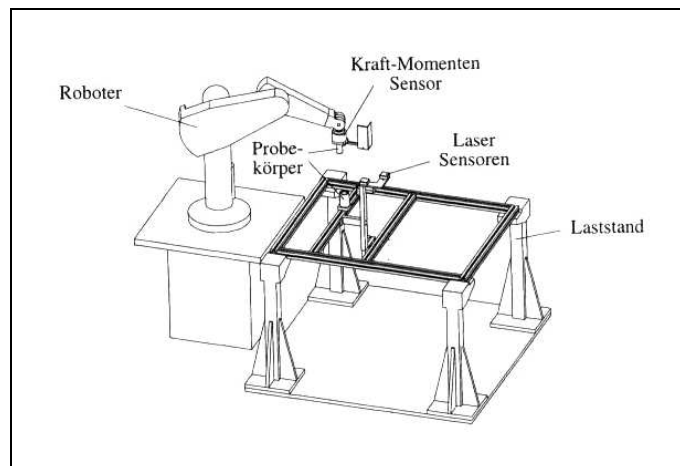


Abbildung 32: Versuchsaufbau mit Roboter und Laststand

PROKOP optimiert die Dynamik und Regelung des Gesamtsystems Roboter und Fügeprozess. Auf der Roboterseite erfolgt zunächst die Optimierung der Roboter-eigendynamik in Bezug auf die Kriterien Stoßempfindlichkeit, maximale Fügekraft, Fügetoleranz sowie Führungs- und Störverhalten. Nebenbedingungen ergeben sich für die Gelenkwinkel, die Motormomente, die Reglerstabilität und für singuläre Positionen. Der zweite Schritt optimiert die Prozessdynamik mit den Kriterien Fügezeit, Führungs- und Störverhalten sowie Stellaufwand. Die hierfür geltenden Nebenbedingungen betreffen prozesstechnische Aspekte wie Fügekräfte, Motormomente und Schwingungserscheinungen, weiterhin eine Vielzahl konstruktiver Eigenschaften für die Fügepartner selbst, also Fragen der „fügegerechten Konstruktion“, und sie betreffen schließlich auch numerische Fragen. Auf dieser Basis wird dann eine Regelung für das Gesamtsystem entworfen, die damit gewissermaßen beide optimierte Teilsysteme zusammenfasst. Die Theorie ist

aufwendig, überzeugend und durch viele Laborexperimente verifiziert.

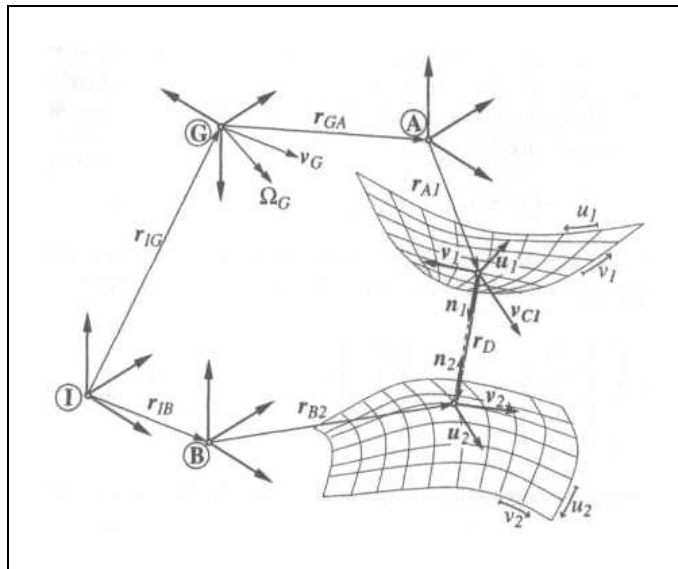


Abbildung 33: Kontaktpunkt zwischen zwei Flächen

Eine Weiterführung dieser Arbeiten erfolgte durch RAPHAEL BURGMAIR (2002) und durch KATJA DAUSTER (2002). BURGMAIR befasst sich mit der Dynamik und Regelung von Manipulator und Prozess für das Fügen von sehr weichen Bauteilen wie zum Beispiel Gummitteilen oder anderen viskoelastischen Komponenten. In diesem Fall wird die Prozessdynamik besonders aufwendig und wegen der großen Deformationen der Fügepartner auch schwierig zu modellieren. Daraus ergibt sich eine besondere Regelung des Manipulators beim Fügen, die gerade die Unsicherheiten beim Führen solcher weicher Teile ausgleichen muss. Herrn Burgmair gelang eine Lösung in überzeugender Weise, sowohl theoretisch als auch experimentell. Frau DAUSTER verfolgte den Gedanken, mit einer adaptiven und lernfähigen Regelung des Gesamtsystems die typischen Eigenschaften einer Serienproduktion auszunutzen, nämlich die ständige Wiederholung der gleichen Abläufe bei langsamer Abnutzung des Montagesystems. Durch adaptive und lernfähige Regelungsprozesse lässt sich mehr Zuverlässigkeit und Sicherheit erzeugen. Dies setzt Frau Dauster theoretisch und experimentell mit Hilfe geeigneter Verfahren wie etwa die LQ-Regelung, Bellman- und Ljapunov-Verfahren um, wobei ihre Entwürfe auch vorausschauende Eigenschaften aufweisen. Auch hier konnten überzeugende experimentelle Nachweise geführt werden.

Der Sonderforschungsbereich 336 hatte in Form eines Transferprojektes mit der Industrie ein interessantes Nachspiel, nämlich die Verbesserung der Dynamik und

Regelung eines Spezialroboters der Firma Wälischmiller am Bodensee. Dieser TELBOT TB 100 besitzt eine bemerkenswerte Kinematik. Der Antrieb aller rotatorischen Gelenke erfolgt von der Basis aus mit Hilfe konzentrisch angeordneter Hohlrohrpakete, die jedem Gelenk eine Beweglichkeit von 360 Grad verschaffen. Damit ist dieser Robotertyp sehr gut für schwer zugängliche, enge Bereiche im Weltraum oder unter Wasser geeignet. Er wird derzeit in nuklearen Anlagen eingesetzt. ALEXANDER SCHLOTTER (2000) entwickelte hierfür dynamische Modelle und verschiedene Regler zur Unterdrückung der Schwingungen an der Roboterhand. Sie konnten zusammen mit der Firma erfolgreich getestet und umgesetzt werden.

3.2.4.2 Künstliche Finger

Durch die Initiative der Informatiker, vor allem von Professor Ritter in Bielefeld, gelang es, Ende der achtziger Jahre ein großes Projekt in Gang zu setzen, das vom damaligen Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert wurde und sich mit dem Forschungsthema „Sensorische Kontrolle mit neuronalen Netzen (SEKON)“ beschäftigte. In diesem Rahmen konnte der Lehrstuhl B für Mechanik eine hydraulische Hand entwickeln, die wegen der am Menschen orientierten Größe der Finger besondere Anforderungen an die Auslegung der Hydraulik stellte. Um Greifen experimentell und regelungstechnisch zu verwirklichen, mussten Probleme der Kontaktdynamik des Greifens und Probleme der Dynamik und Regelung kooperierender Finger behandelt werden. Diesem Komplex widmeten sich drei Mitarbeiter.

ROLAND MENZEL (1995) entwickelte das Konzept der Hand mit vier gleichartigen Fingern und den Finger selbst. Nach einigen Vorüberlegungen entschieden wir uns für einen hydraulischen Fingerantrieb, der in Bezug auf Dämpfung, Kraftherzeugung und schließlich Kraftregelung einzigartige Vorteile bietet. Der Preis für diese Vorteile besteht in extrem kleinen Hydraulikzylindern, für die einige Dichtungs-, Zuleitungs- und Fertigungsprobleme zu lösen waren. Der Antrieb und die Messungen erfolgen durch eine zentrale Hydraulikstation, die aus einem Maxon-Motor mit zweistufigem Planetengetriebe, einem Zahnstangenantrieb für den Hydraulikzylinder und aus Weg- und Drucksensoren besteht. Erstaunlicherweise konnten damit die Finger trotz einer etwa vier Meter langen ölhydraulischen Übertragungsleitung sehr feinfühlig und direkt geregelt werden. Das System bewährte sich für Greifvorgänge hervorragend und war jahrelang in Bielefeld für Greifversuche im Einsatz. Es gab Messeausstellungen, unter anderen auch in Hannover.

Um mit einer künstlichen Hand mit vier Fingern greifen zu können, benötigt man Greifstrategien, die von KURT WÖLFL (1995) entwickelt und umgesetzt wurden. Mit der Bahnplanung betrachtete er dabei die gewünschte Bewegung des zu manipulierenden Gegenstandes und die für die Realisierung dieser Bewegung notwendigen Kräfte. Die Greifplanung bestimmt aus der Vielzahl der möglichen Griffe den günstigsten, wobei vier Strategien zum Einsatz kommen, die Fingerkraftoptimierung, die Griffoptimierung, die Fingerkraftoptimierung mit Gleiten und die Griffoptimierung mit Umgreifen. Hierfür wird zur Optimierung mit entsprechenden Nebenbedingungen wie etwa Kontakt, Nichteindringen, Gleichgewicht und anderen ein SQP-Verfahren benutzt. Schließlich hat sich eine Handplanung als günstig erwiesen, die die Hand immer so positioniert, dass alle zu erwartenden Greifpunkte sicher zu erreichen sind. Die Strategien wurden für verschiedene Körper erfolgreich umgesetzt, selbst rohe Eier konnten mit der vierfingerigen Hand sicher und stabil manipuliert werden.

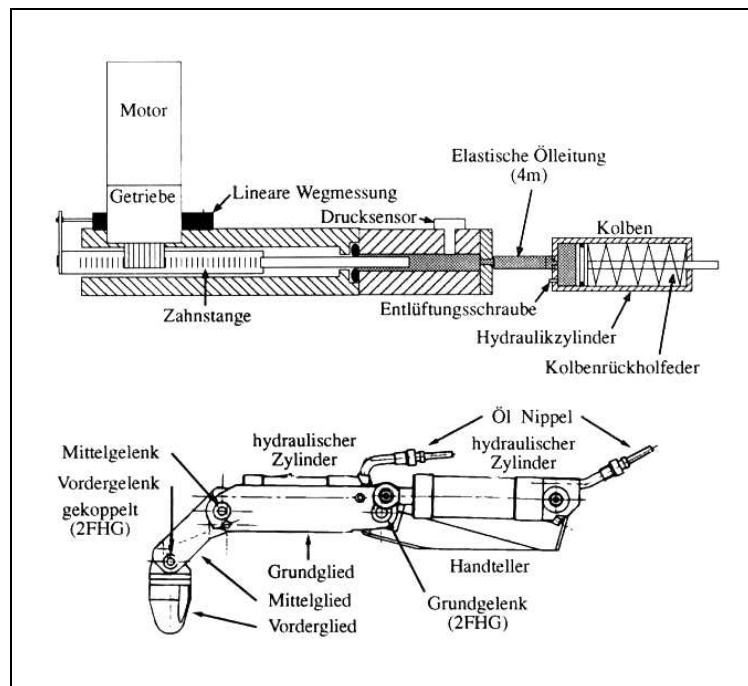


Abbildung 34: Hydraulischer Finger mit Antrieb

Die Manipulationen von Gegenständen mit den Fingern einer Hand sind artverwandt und weitestgehend dasselbe wie die Vorgänge bei kooperierenden Robotern. Es lag daher nahe, dieses Thema im Rahmen von SEKON anzugehen, um wechselseitige Synergien zu erzeugen. Bei einer Beschränkung auf zwei kooperierende Roboter wurde der Schwerpunkt auf die Regelung mit neuronalen Netzen ge-

legt. THOMAS CONNOLLY (1995) setzte diese Idee theoretisch und experimentell um. Um die Online-Eigenschaften seines Versuchstandes mit zwei Robotern und der dazugehörigen Regelung zu verbessern, nutzte er in geschickter Weise Formelmanipulationssysteme, um besonders die inverse Kinematik und Kinetik analytisch auszuwerten. Für kooperierende Prozesse setzt er einen Mehrgrößen-PID-Regler und für Fügeprozesse mit zwei Robotern zweischichtige neuronale Netze ein. Theorie und Experiment stimmten sehr gut überein.

Im Zusammenhang mit künstlichen Fingern muss die Arbeit von MARTIN SCHLEICH (2004) genannt werden, die im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 438 (Mathematische Modellierung, Simulation und Verifikation in materialorientierten Prozessen und intelligenten Systemen) entstanden ist. Das Thema legte den Gedanken nahe, einmal die Tauglichkeit von Formgedächtnismaterialien für den Antrieb künstlicher Finger nachzuweisen und dabei gleichzeitig das in Zukunft zu erwartende Potential für derartige Anwendungen auszuloten. Hierzu entwickelte Herr Schleich auf der Basis eines bekannten Materialmodells und mit einem geeigneten Versuchsaufbau die Voraussetzungen für den Einsatz von Formgedächtnismaterialien, speziell von NiTi-Legierungen. Für den Fingerantrieb eignen sich Runddrähte sehr gut, sie werden in einem Parallelpaket angeordnet, um genügend große Kräfte erzeugen zu können. Die Fingerbewegung wird durch ein Agonisten-Antagonisten-Prinzip in Gang gesetzt. Der mit drei Freiheitsgraden versehene Finger erreicht Zykluszeiten von weniger als zwei Sekunden (ein Zyklus = einmal Öffnen und Schließen). Der konstruktive Aufbau ist sehr kompakt, das gesamte Fingergewicht beträgt 50 Gramm. Mit einem Drahtpaket von 20 Drähten konnten etwa zwei Newton Kraft erzeugt werden. Damit ist die Eignung dieser Antriebsvariante zweifelsfrei nachgewiesen.

3.2.4.3 Laufmaschinen

Das Interesse an künstlichen Laufmaschinen ist uralt, es hat in den vergangenen Jahrhunderten zu einigen ausgeklügelten mechanischen Varianten geführt. Dennoch ermöglichte erst die technologische Entwicklung der letzten Jahrzehnte, besonders im Bereich der Sensorik, der Aktorik und der Rechner-technik, den Bau solcher Laufmaschinen, die den biologischen Vorbildern etwas nahe kommen, wenn auch in bescheidenem Maße. Mitte der achtziger Jahre versuchte ich zusammen mit dem Kollegen Cruse aus Bielefeld, ein international ausgewiesener Neurobiologe für Insekten, einen DFG-Schwerpunkt für Laufmaschinen zu etablieren. Es schlug zu diesem Zeitpunkt fehl. Aber wir erhielten per Einzelanträge das Geld, um einmal in Bielefeld die neurobiologischen Forschungen an der Stabheuschrecke weiter zu führen und zum anderen eine

sechsbeinige Laufmaschine auf der Grundlage der biologischen Erkenntnisse aus Bielefeld in München zu bauen. Wir nannten sie sehr viel später MAX. Der Bau solcher Laufmaschinen ist komplexe Systemarbeit auf hohem Niveau, die ein ausgeprägtes interdisziplinäres Wissen von der Mechanik und Konstruktion bis hin zur Sensorik, Aktorik, Regelungs- und Computertechnik erfordert. Vielleicht ist sie gerade deshalb bei den besten Studenten so beliebt.

Wir konnten für die Auslegung und Realisierung von MAX zwei Doktoranden einsetzen, HANS-JÜRGEN WEIDEMANN (1993) für Dynamik, Regelung und Sensorik und JÜRGEN ELTZE (1994) für die Konstruktion und einige Sonderprobleme. So mussten aus dem Datenmaterial der neurobiologischen Forschungen die für eine große Maschine notwendigen Daten wie Geometrie, Massen, Massen-geometrie, Kräfte und Momente rekonstruiert werden. Wir wollten uns an das biologische Vorbild der Stabheuschrecke halten. Weiterhin ergaben sich interessante Auslegungsprinzipien der Biologie aus einem Optimierungsproblem mit unbekannten und zu ermittelnden Gütekriterien, das die Bewegungsgleichungen mit den Kontaktkräften am Boden mit gemessenen Bodenkräften der Stabheuschrecke in Beziehung setzten. Insektenbeine und ihre Kinematik sind höchstwahrscheinlich nach dem Prinzip (60% minimales Biegepotential und 40% Verspannungsfreiheit) ausgelegt, so das Ergebnis, das wir für die Auslegung von MAX ebenfalls einsetzten. Die von ELTZE entwickelten Gelenkkonstruktionen sind bis heute ein Maßstab. WEIDEMANN übernahm die in Bielefeld erforschten Regelungsprinzipien für die Laufregelung von MAX, wobei die biologischen Vorgaben technisch umgesetzt wurden. Die daraus entwickelte Regelung in drei Schichten ist bis heute eine der modernsten Laufmaschinenregelungen, zumindest für Sechsbeiner, da sie ungewöhnlich adaptiv und autonom arbeitet und dabei die Fähigkeit besitzt, auch Störungen und Hindernisse selbstständig und ohne äußeren Eingriff zu bewältigen. Nicht zuletzt aus diesem Grund sind diese Art von Reglern bei Insekten wieder in das zentrale Interesse von Neurobiologen gerückt. MAX hat viele Messen und Fernsehsendungen bestritten.

JOSEF STEUER (2002) erweiterte die Regelung von MAX durch ein Kame-rasystem mit Bildverarbeitung. Die drei Schichten der ursprünglichen Regelung wurden durch eine vierte überlagerte Schicht ergänzt, die mehr Autonomie und in bescheidenem Maße eigene Entscheidungsfähigkeit erzeugte. Das Bildver-arbeitungssystem analysiert Hindernisse und gibt diese Information an einen Al-gorithmus weiter, der daraus Entscheidungen ableitet, wie MAX das Hindernis umgehen kann. Es ist dies eine erste einfache Variante des Systems, das später dem Zweibeiner JOHNNIE eine gewisse Autonomie verleiht. Viele erfolgreiche Versuche bestätigten das Konzept.

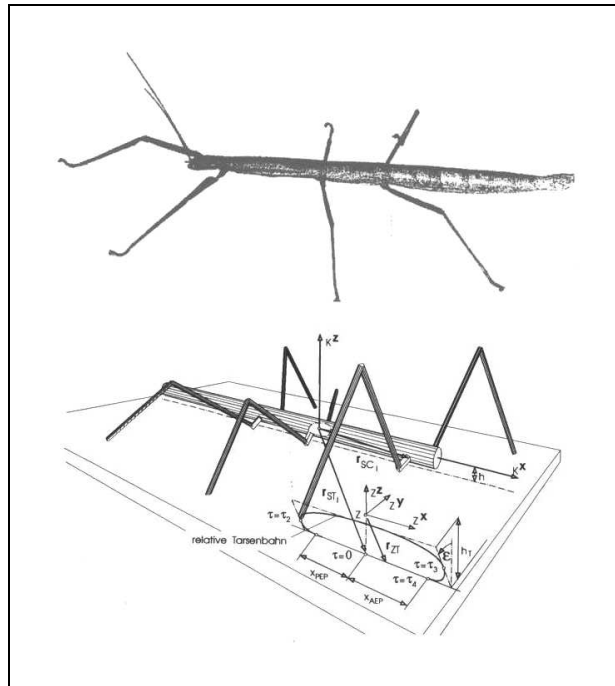


Abbildung 35: Kinematik einer Stabheuschrecke
(nach H. Cruse)

Für die sechsbeinige Laufmaschine MAX erhielt ich im Jahre 1993 zusammen mit den Kollegen Cruse, Bielefeld, Chernousko, Moskau, und Clarac, Marseille, den Körberpreis für die europäische Wissenschaft, der immer auch mit der Vorstellung eines neuen Projektes verbunden ist. Wir entschieden uns damals, eine Laufmaschine zu bauen, die sich durch Rohre bewegen kann. Die Motivation kam wesentlich aus der Industrie, die mit Nuklearanlagen zu tun hat, wie Siemens in München, und die sich mit Abwassersystemen beschäftigt, besonders mit der Inspektion und der Reparatur von Rohren, wie etwa die Firma Brochier in Nürnberg. Nach einigen Vorüberlegungen wählten wir eine Konfiguration mit acht Beinen um einen Zentralkörper. Je vier Beine mit zwei Freiheitsgraden sind in zwei radialen Ebenen symmetrisch angeordnet, beim Laufen durch ein Rohr kommen davon jeweils zwei gegenüberliegende Beine der beiden radialen Ebenen zum Einsatz. Sie liegen dann in einer axialen Ebene, in der die Maschine so weit im Rohr vor- oder zurückgeschoben wird, wie es die Beinkinematik erlaubt. Dann wird zur zweiten axialen Ebene gewechselt, die aus dem zweiten Paar gegenüberliegender Beine der beiden radialen Ebenen besteht.

THOMAS ROSSMANN (1998) legt diese Maschine aus, entwirft alle Regelungs-

konzepte, wählt die geeignete Sensorik und Aktorik aus, entwickelt die Bussyteme und realisiert schließlich das Ganze. Der Regler lehnt sich in seinen Grundstrukturen an den von MAX an, geht aber dann weit darüber hinaus. Ein Rohrkrabber braucht eine zuverlässige Kraftregelung, für die gewählte Konfiguration muss das Problem des Beinwechsels regelungstechnisch gelöst werden, die Kontaktkräfte müssen den Roboter tragen, aber gleichzeitig optimal auf die Beine und die Antriebe verteilt werden. Dies alles wurde mit einer Regelungsstruktur mit zentralen und dezentralen Operations- und Koordinationsebenen hervorragend gelöst. Bei den Antrieben gab es eine enge Zusammenarbeit mit Harmonic Drive, in deren Verlauf eine neue und sehr effektive Theorie für Harmonic Drive Getriebe auf der Basis nichtglatter Dynamik entstand und mit Messungen der Firma verifiziert wurde. Sie ist bis heute Basis aller Reibbeobachter in solchen Antrieben. Der Rohrkrabber MORITZ läuft in geraden und gekrümmten Rohren beliebiger Neigung, er wurde ebenfalls mit viel Erfolg auf Messen ausgestellt.

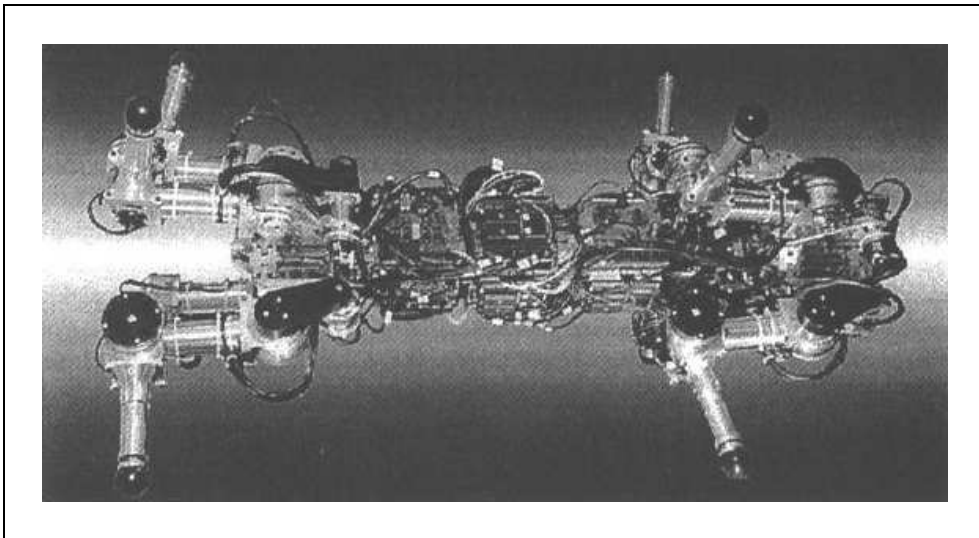


Abbildung 36: „MORITZ“

Eine Weiterführung dieser Arbeiten gab es mit der Dissertation von ANDREAS ZAGLER (2005), die im Sinne einer Durchführbarkeitsstudie die Möglichkeiten untersuchte, mit einem zusätzlichen Gelenk im Zentralkörper des Rohrkrabbers mehr Beweglichkeit zu erreichen. Eine solche Beweglichkeit ist zur Bewältigung sehr enger recht- oder schiefwinkliger Abzweigungen unbedingt erforderlich. Die hierfür notwendige Theorie und das darauf aufbauende Regelungskonzept sind außerordentlich aufwendig, sie zeigten aber, dass das angestrebte Ziel erreicht werden kann. Dies bestätigten auch einige experimentelle Prinzipversuche.

Nach langen Bemühungen gelang es im Jahre 1997, den DFG-Schwerpunkt 1039 „Autonomes Laufen“ auf den Weg zu bringen. Im üblichen Rahmen einer sechsjährigen Finanzierung nahmen an diesem Schwerpunkt jeweils sieben biologische und ingenieurwissenschaftliche Institute teil, deren Themen sich auf grundlegende Probleme des biologischen und technischen Laufens, auf zwei-, vier- und sechsbeinige Laufmaschinen aufteilten. Am Lehrstuhl B für Mechanik entschieden wir uns, auch angesichts des Hintergrundes mit MAX und MORITZ, einen Zweibeiner zu entwickeln und zu bauen. Er sollte schnell laufen können, und er sollte über bessere Füße verfügen als bisherige Varianten. Bekanntlich ist ja eine möglichst perfekte Fußdynamik die Voraussetzung für gutes und schnelles Laufen.

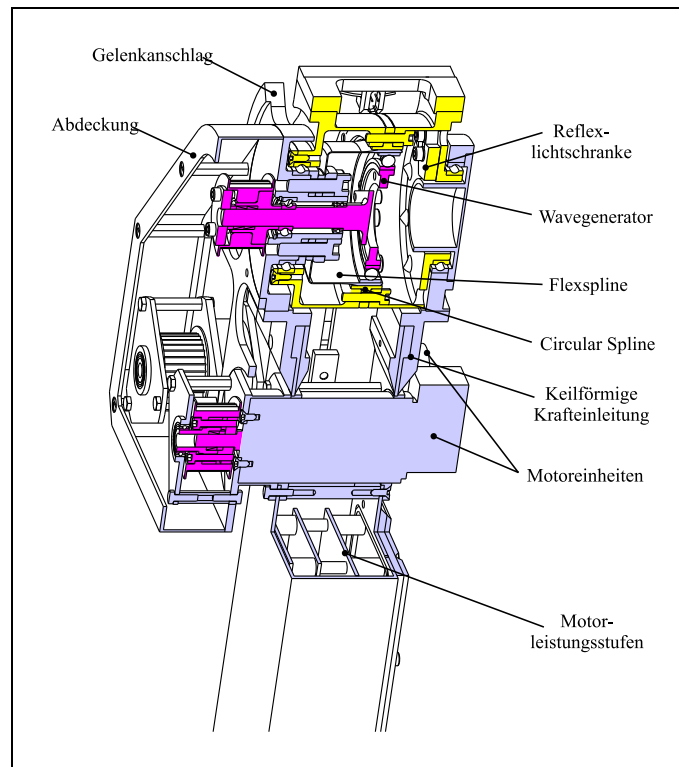


Abbildung 37: Hüftgelenk

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten übernahmen MICHAEL GIENGER (2004) und KLAUS LÖFFLER (2005), wobei Gienger sich schwerpunktmäßig mehr um Fragen der Hardware, also um Konstruktion, Antriebe, Sensorik und Rechner, und Löffler sich um Probleme der Software, also um Dynamik und Regelung, Modelle und Reglerkonzepte, kümmerten. Bau und Realisierung übernahm wie immer und sehr erfolgreich unsere mechanische und elektronische Werkstatt. Die Konzeption von JOHNNIE entstand aus unseren Erfahrungen mit anderen

Projekten und natürlich aus der Kenntnis internationaler Projekte zum Thema Zweibeiner. Im Rahmen des SFB 462, Sensomotorik, bearbeiteten wir ein Teilprojekt zum hemiparetischen Laufen und entwickelten hierfür auch Modelle des gesunden und kranken menschlichen Laufens. Die damit verbundenen Daten waren für die Auslegung unseres Zweibeiners sehr nützlich. JOHNNIE besitzt 17 Gelenke, besteht aus nahezu 1000 Einzelteilen und wiegt 45 kg. Er verfügt über etwa 80 Sensoren, die alle Informationen über den aktuellen Laufzustand an den Regler weiterleiten. Die Reglerarchitektur besteht aus drei Ebenen, in denen die globale Gangkoordination, die Trajektoriengenerierung und die eigentliche Systemdynamik bearbeitet werden. Die Regelung aller Freiheitsgrade erfolgt gleichzeitig, da nur so eine Gangstabilität aufrechterhalten werden kann. JOHNNIE läuft mit etwa 2.4 km/h, was natürlich nicht der Geschwindigkeit entspricht, die wir uns am Anfang vorstellten. Die Gründe sind vielfältig: zu langsame Sensorik und Rechnelektronik, zu langsame Regelkonzepte. Diese Probleme haben derzeit alle Maschinen weltweit. In einem Nachfolgeprojekt sollen sie angegangen werden. JOHNNIE lief auf sehr vielen Ausstellungen, auch zweimal in Hannover.

Für sein letztes Auftreten auf der Hannover Messe 2003 wurde JOHNNIE mit einem Sichtsystem versehen, das am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der TU-München unter der Leitung von Professor Günther Schmidt ausgelegt und entwickelt wurde. Er erhielt damit eine bescheidene Autonomie in dem Sinne, dass er Hindernisse sah, daraus Schlüsse zog, ob er darüber steigt oder darum herum läuft, und schließlich diese Entscheidung im Laufen umsetzte. Ebenso konnte er Treppen erkennen und daraus sein Treppensteigen selbst organisieren. Dies war sicherlich eine Art Weltpremiere für autonome Zweibeiner.

Die Beteiligung am SFB 462, Sensomotorik, wurde bereits erwähnt. Dieser SFB wurde vom Leiter der neurologischen Klinik Großhadern, Professor Brandt, ins Leben gerufen. Er war auch Sprecher. Die wesentliche Idee bestand darin, im interdisziplinären Feld zwischen Neurologie und Ingenieurwissenschaften offene Fragestellungen der Sensomotorik des gesunden und kranken Laufens sowie Probleme der Okulomotorik zu erforschen. Als Teilprojekt übernahmen wir die modell- und computergestützte Rehabilitation von Hemiparetikern und zwar in enger Zusammenarbeit mit der neurologischen Klinik in Bad Aibling unter der Leitung von Professor König. In diesem Zusammenhang erarbeitete zunächst CHRISTIAN LUTZENBERGER (2002) Modelle des Menschen sowohl für gesundes als auch für das typische hemiparetische Laufen. Seine Modelle besitzen 42 Freiheitsgrade, die notwendigen Daten der Geometrie, Massengeometrie, Massen und Gelenkkräfte wurden aus Literatur und Messungen von medizinischen Kollegen rekonstruiert. Sie kamen auch JOHNNIE zugute. Ein neuer Schwerpunkt der Arbeit bestand in

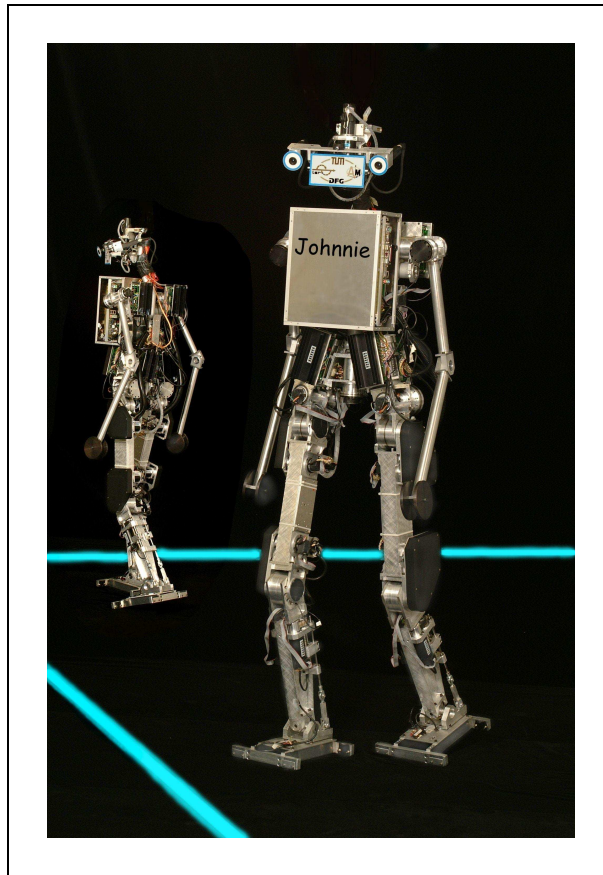


Abbildung 38: „JOHNNIE“

der Ermittlung von Maßgrößen und -zahlen für die Beurteilung von Hemiparese und ihrem Schweregrad. Waren in der Medizin bisher nur kinematische Maßgrößen eingesetzt worden, so konnte nun Herr Lutzenberger eine Reihe von kinetischen Größen ermitteln, die wesentlich deutlicher und zuverlässiger den Grad einer Hemiparese anzeigten. Beispiele sind Bodenreaktionskräfte, Knieextensionsmomente, Energie des hemiparetischen Ganges, Arbeit der Hüftextensoren und andere mehr. Die Größen haben sich in der Praxis bewährt.

Die Forschungen fanden ihre Fortsetzung in der Dissertation von MARKUS WEBER (2004), der einmal die Modelle von Herrn Lutzenberger durch sehr aufwendige Muskelmodelle erweiterte und der zum anderen ein Steuerungs- und Regelungskonzept für die computergestützte Therapie von Hemiparetikern entwickelte. Beides war bereits zu früheren Zeiten angedacht, aber noch nicht ausgeführt worden. Herr Weber stellte dies auf eine überzeugende und präzise Basis, wobei

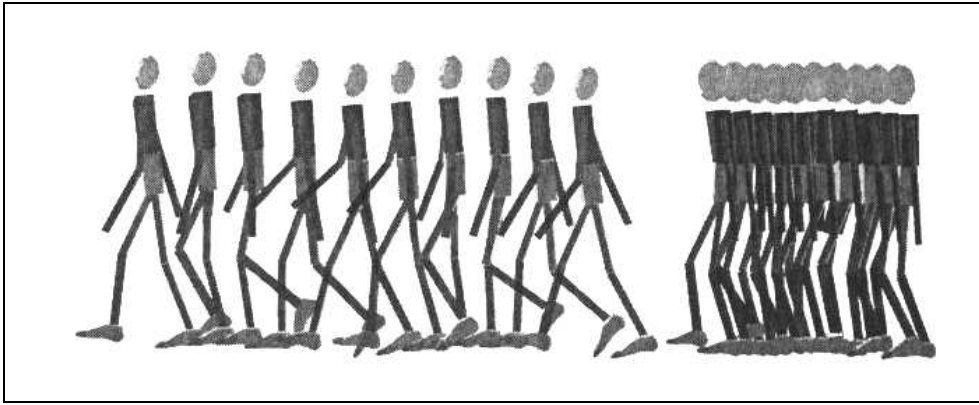


Abbildung 39: Gesundes und hemiparetisches Laufen

er sich auf die Erkenntnisse in Bad Aibling stützen konnte. Sein Regelungskonzept rechnet das Maß für die Elektrostimulation aus, das für einen gewünschten Fortschritt der Therapie jeweils notwendig ist. In dieser Struktur werden das Restlaufvermögen des Patienten, eine bestimmte Sollvorgabe und der aktuelle Zustand des Therapie-Prozesses berücksichtigt. Es gehen das direkte und das inverse Menschmodell sowie ein inverses Elektrostimulationsmodell ein. In allen Stufen dieser computergestützten Therapie kann der Arzt oder der Therapeut eingreifen.

3.3 Forschungsfinanzierung

Von den über 80 Doktoranden des Lehrstuhls während meiner Zeit wurden 60 mit Drittmittel finanziert. Die Drittmittelgeber teilen sich dabei nach der Höhe der Beiträge folgendermaßen auf:

- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) zu etwa 60%
- Industrie (MTU, BMW, FVV, Sartorius, Cyclo u.a.) zu etwa 30%
- Sonstige (BMFT, VW-Stiftung, EU, u.a.) zu etwa 10%

Der Gesamtwert dieser Drittmittelfinanzierung beträgt nach heutigen Standards (Personal, Material, Investitionen) und bei einer durchschnittlichen Laufzeit der

Drittmittelpromotionen von etwa 4-5 Jahren rund 20 Mio. EURO. Der hohe Anteil der DFG-Unterstützung verteilt sich auf Einzelanträge, auf fünf Sonderforschungsbereiche und auf einen Schwerpunktsbereich. Diese sind:

- SFB 336, Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung (Sprecher Milberg, Ehrlenspiel, TUM)
- SFB 365, Umweltfreundliche Antriebstechnik für Fahrzeuge (Sprecher Höhn, TUM)
- SFB 462, Sensomotorik, Analyse biologischer Systeme, Modellierung und medizinisch-technische Nutzung (Sprecher Brandt, LMU)
- SFB 438, Mathematische Modellierung, Simulation und Verifikation in materialorientierten Prozessen und intelligenten Systemen (Sprecher Hoffmann, TUM)
- SFB 453, Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion (Sprecher Färber, TUM)
- SPP 1039, Autonomes Laufen (Sprecher Pfeiffer, TUM)

4 Messen und Ausstellungen

4.1 Maschinen

Hannover Messe, 1987



Technische Universität München
Lehrstuhl B für Mechanik

Forschung
Technologie
Transfer



Regelung elastischer Rotoren

Der Betrieb von Rotoren im Maschinenbau, insbesondere im Turbomaschinenbau, ist stets von einer Reihe von Problemen begleitet, die durch geeignete konstruktive Maßnahmen klein gehalten werden müssen. Hierzu gehören beispielsweise destabilisierende Wirkungen bei Gleitlagerkopplungen, innere dissipative Effekte, Querkraftanregungen bei unsymmetrischen Strömungsverhältnissen in Turbomaschinen und Unsymmetrien im Rotor-Lager-Aufbau. Forderungen nach höheren Drehzahlen, verbesserter Ausfallsicherheit und längerer Lebensdauer machen schon im Auslegungsstadium einen wachsenden Aufwand an konstruktiven Überlegungen zusammen mit umfangreichen Schwingungssimulationen notwendig, um möglichst optimale Rotorbauteile realisieren zu können.

Eine Abstimmung der Konstruktionsparameter in den variablen Grenzen (passive Optimierung) führt zu einem Kompromiß, der in manchen Fällen die an den Rotor gestellten Anforderungen nicht gut genug erfüllen kann. Eine weitere Verbesserung ist dann nur noch durch den Einsatz aktiver Komponenten in Form einer Regelung zu erreichen. Erfolg oder Mißerfolg einer solchen aktiven Maßnahme hängen von vier Faktoren ab:

- Entwicklung geeigneter Stellglieder für die Realisierung der Regelkräfte.
- Anordnung dieser Stellglieder am Rotorsystem.
- Mögliche Meßanordnungen am Rotorsystem und die daraus zu gewinnenden Meßinformationen.
- Problemangepaßte Regelkonzepte.

Zur Überprüfung solcher Regelkonzepte wurde der in Bild 1 als Ersatzmodell gezeigte Versuchstand entwickelt. Die Regelkräfte können dabei entweder direkt über Magnetstellsysteme auf den

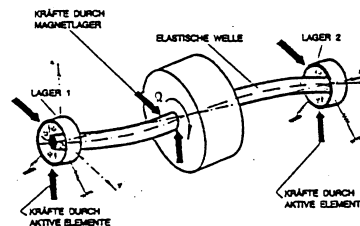


Bild 1: Mechanisches Ersatzmodell

Rotor aufgebracht werden, oder sie wirken indirekt über die Lagerschalen mittels elektromagnetischer (oder hydraulischer) Stellglieder. Gerade der letzte Fall dürfte bei den meisten Rotoren leichter zu realisieren sein. Die Versuchsanlage bietet weiterhin den Vorteil, daß über ein aktives Magnetlager nahezu beliebige Anregungsmechanismen (zirkulatorische Kräfte, Fluidkräfte u. ä.) simuliert werden können, was eine einfache praxisnahe Testmöglichkeit für die zu untersuchenden Regelkonzepte ergibt.

Die Erfahrungen mit der Versuchsanlage in Verbindung mit umfangreichen Simulationen zeigen, daß mit problemangepaßten Regelkonzepten und den passenden Stellgliedern das Schwingungsverhalten von Rotorsystemen in jedem Falle verbessert werden kann, seien es nun neu zu konzipierende Rotoren oder bereits existierende Anlagen. Ein prozeßrechnerorganisierter Regler bietet zusätzlich die einfache Möglichkeit, durch Anpassung der Reglerparameter jedem Betriebsfall Rechnung zu tragen (Vollast/Teillast, instationärer Betrieb, Gleitlagertemperaturen u. ä.).

Hydraulic Actuator for Rotor Systems

In many rotor systems (e.g. turbines, generators, compressors) various vibration problems occur such as high resonance amplitudes due to unbalance excitation, nonlinearities, destabilizing effects caused by journal bearings or fluid forces in turbines. Demands for higher frequencies, lighter machine components, higher durability require greater efforts already at the design stage.

Tuning the design parameters within variation limits (passive optimization) yields a compromise that in some cases does not satisfy the given requirements. Further improvement can be achieved only by application of active components in the form of a control system. The success of such active measures depends mainly on the availability of suitable actuators.

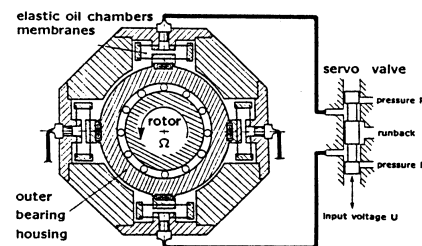


Fig. 1: schematic of the hydraulic actuator

For this purpose the presented hydraulic actuator illustrated in Fig. 1 was developed. It consists of four cylindrical chambers which are sealed by elastic membranes. Opposing chambers — relating to one control direction — are connected to one servo valve. The rotor vibrations are measured by sensors, processed by an electronical control unit and fed back to the actuator in the form of the control voltage U (see Fig. 2).

The servo valve transforms this voltage into a pressure difference in the chambers. Due to the membrane elasticity a force acts via the bearing on the rotor. Depending on the implemented control law this force can be used for damping rotor vibrations. The actuator is characterized by the following criteria:

- compact system generating large forces (high power density),
- frequencies up to 300 Hz,
- good safety properties due to mechanical bearing suspension,
- amplitudes in the order of the rotor vibrations (up to 0.5 mm),
- high passive damping,
- no friction and sealing problems.

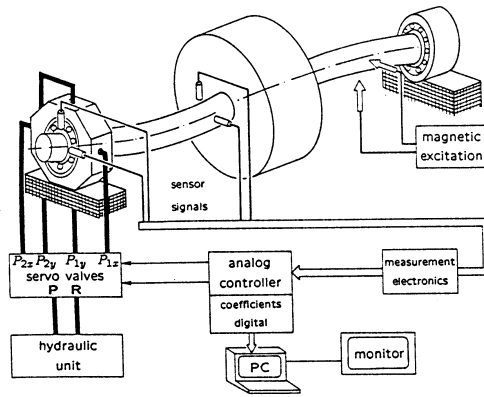


Fig. 2: schematic assembly of the test rig

For the experimental testing of the actuator a test rig was built. Its schematic assembly can be seen in Fig. 2. It consists of a rotor (elastic shaft with a runner) running in two roller bearings. One bearing is actively suspended by the hydraulic actuator. Displacements and velocities at the bearing and near the runner as well as accelerations of the bearing can be used as measurement signals. Furthermore a magnetic bearing is integrated for simulating different excitation forces (e.g. fluid forces at turbine blades, external forces). Thus a wide range of dynamical problems can be investigated by experiment.

The selection and feedback gain of each measurement signal (control design) depends on the desired dynamical behavior. In most cases simple controllers are sufficient for a substantial improvement of the system dynamics (e.g. linear velocity feedback, see Fig. 3). With the aid of simulation programs controllers can be optimized using criteria such as maximal damping of the eigenvalues, minimal resonance amplitudes or quadratic integral criteria.

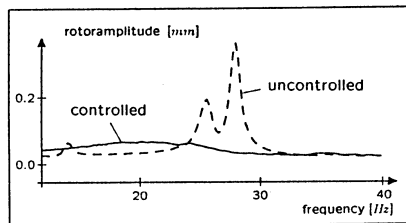


Fig. 3: run-up through the first critical speed

The measurement results in Fig. 3 show the course of the runner amplitude versus the rotor speed. At ca. 28 Hz one can recognize high resonance amplitudes. The amplitude can be considerably reduced by activating the controller and therefore a smoother operation of the rotor is achieved.

In the experiment in Fig. 4 the magnetic bearing applies a discrete constant force on the rotor which leads to a deviation from the reference position and a long transient response. A proportional and integral displacement feedback together with an active vibration damping of Fig. 3 yields a fast correction of the reference position and a short transient response. The remaining vibrations result from the unbalance.

Extensive measurements and computer simulations show that many vibration problems in rotor systems can be solved efficiently using a hydraulic actuator with a problem adapted control concept. Investigations on industrial facilities already demonstrate the feasibility for further applications.

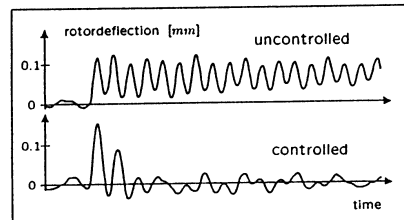


Fig. 4: deviation correction of vibration damping



The TUM Hydraulic Hand

The main goal in the development of multi-fingered grasping systems is the realization and automation of the fine manipulation of complex objects. A greater dexterity of the robot-grasper-system arises from the smaller mass and workspace of the fingers. The detailed design and complex mechanics of the hand coupled with the development and use of grasp strategies make possible the grasping and active manipulation of objects of varying geometry.

Because of the desired versatility in the technical application of the TUM Hand, strict weight and mountability requirements had to be maintained. The goal was to be able to mount the hand on the various light weight robots currently available without drastically reducing their payload.

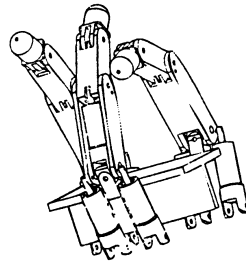


Figure 1: The TUM Hand

For this reason, the multi-fingered TUM Hand, which is driven by a newly conceived

actuator system with one-sided hydraulic cylinders, was developed. This system is schematically shown in Figure 2. Each finger is actuated by three one-sided hydraulic cylinders, in which strongly precompressed springs are found. In the actuator blocks, which can be flexibly mounted on the ground, the rotary motion of the DC electric motors is transferred by gearing and a toothed rod into a translatory motion of the actuating pistons. This translatory motion is measured by a linear potentiometer. 4 m long elastic oil-hoses connect the finger pistons to the actuator blocks. If the actuating piston moves forward, the finger closes. During finger opening, the precompressed spring is needed to force the oil back. Changes in oil pressure are measured by pressure sensors with an operating range of 0 – 70 bar which are integrated into the actuator blocks. The behavior of the hydraulic actuation system is described by a mathematical model.

The TUM hydraulic Hand distinguishes itself through the following characteristics:

- large finger forces (up to 30 N),
- opening and closing speed ($\geq 0,3$ s),
- small weight (750 g for the three-fingered hand),
- accurate positioning ($\Delta x \leq 1$ mm),
- high modularity,
- ability to be easily mounted on a robot.

Technische Universität München

Lehrstuhl B für Mechanik

Prof. Dr.-Ing. F. Pfeiffer

Arcisstraße 21, D-80290 München

Telefon (0 89) 21 05-32 00, Telefax (0 89) 21 05-32 09

Please contact: Dipl.-Ing. R. Menzel or M.Sc. K. Woelfl

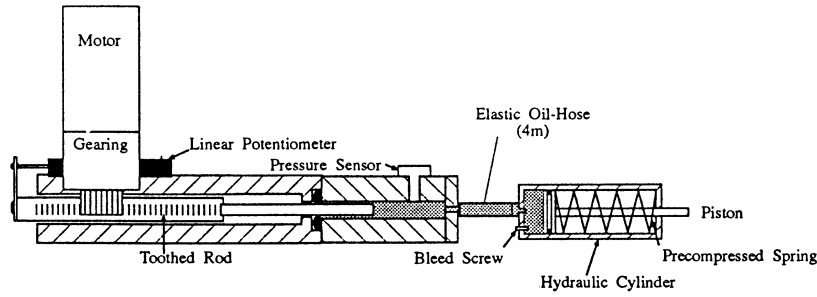


Figure 2 : The Actuator System

The TUM Hand is controlled using a two-tiered approach. The calculation of the optimal grasping points and finger forces is performed offline in the upper controller level. These desired values are then realized in the lower level by a cascaded controller.

The success of a manipulation process is extremely dependent on the choice of the finger positions and the finger forces. It is the task of the grasp strategies of the upper controller level to select the optimal finger configuration from the abundance of possible grasp combinations. The calculation of the most favorable finger combination leads to a nonlinear optimization problem with necessary conditions. In order to ensure that no finger assumes an excessively large part of the external forces, the difference between the finger forces is minimized. The sum of the finger forces must be in equilibrium with the external forces. Additionally, the finger forces must constantly remain within the friction cone, in order to prevent object slippage.

The lower control level must then realize the desired position and forces calculated by the upper level grasp strategies. As opposed to the master-slave concept in which the fingers are each given different areas of responsibility, a manipulation concept was developed for the TUM Hand in which the various fingers are treated equally. The fingers are bounded virtually by a spring-damper model to the so-called zero-force path, which is implicitly given by the grasp strategies. Characteristic to this concept is the dissolving of the usually strict separation between force and position controlled directions. Figures 3 and 4 show measurements

in which the hand rotates a cylindrical object about its major axis. The desired values provided by the grasp strategies in the upper controller level are shown alongside the actual values realized by the low level cascaded controller.

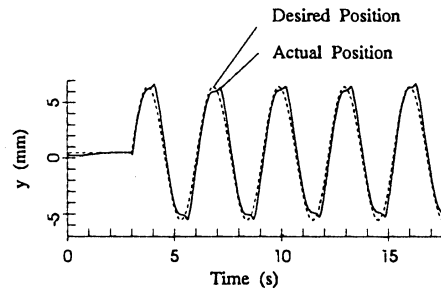


Figure 3 : Desired and Actual Position

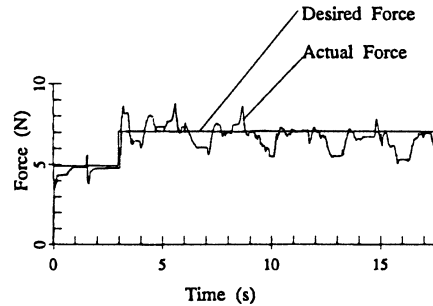


Figure 4 : Desired and Actual Force

Innovationen durch geregelte und optimierte Mehrkörperdynamik

Versuchsstand: Schwingungsminderung in Hebelmechanismen durch Kraftregelung mit redundanten Servoantrieben

Schnellaufende Maschinenantriebe mit ungleichmäßig übertragenden Getrieben sind oft von unerwünschten Schwingungserscheinungen infolge der wechselnden Trägheitskräfte und technologisch bedingten Belastungen begleitet. Diese wechselnden Kräfte und Momente äußern sich z.B. als Rückwirkungen auf den Antriebsmotor, als Fundamentalschwingungen, Spiel-Stöße in den Gelenken, Reibverluste in den Gelenken oder durch eine Verfälschung der gewünschten Abtriebsbewegung infolge von Schwingungen elastischer Bauteile.

Mit den Forderungen nach höheren Drehzahlen und Leichtbauweise muß dem dynamischen Verhalten eine gebührende Beachtung geschenkt werden. Es müssen Methoden zur Beherrschung der Phänomene bereitgestellt werden.

Der PC-gesteuerte Mechanismenprüfstand in Bild 1 besteht aus einer Kurbelschwinge mit je einem redundanten Servoantrieb an Koppel und Schwinge. Piezokraftsensoren messen die Lagerkräfte zum Fundament. Die bürstenlosen Resolvertmotoren liefern Lage-, Winkelgeschwindigkeits- und Drehmomentensignale.

Die **neue Methode** des aktiven Gelenkkraftausgleiches durch **redundante Antriebe** nutzt eine Lernregelung der Motormomente und kann wechselnde Kräfte kompensieren. Der Hebelmechanismus wird dabei gezielt innerlich verspannt und Spiel-Stöße, Lärm, Verschleiß und Vibrationen können vermindert werden.

Die hier vorgestellte Methode zielt auf die einzelnen dynamischen Effekte infolge der wechselnden Zwangskräfte innerhalb des Mechanismus, sie verändert nicht Schwingungen der Gesamtmaschine im Fundament.

Mit einer digitalen Momentenregelung der Redundant-antriebe kann das Regelziel per Software flexibel an die Maschinenbedingungen angepaßt werden.

Redundantantriebe sind an der 'fertigen' Maschine nachrüstbar. Sie sollten bevorzugt als Servomotoren an Wellen im Gestell angebracht werden. Aber auch Anordnungen als Stellglied zwischen bewegten Körpern, z.B. Elektromagnet, Piezotranslator, Hydraulik- oder Pneumatikzylinder, sind denkbar.

Der exakte Ausgleich genau einer Gelenkkraftkompo-

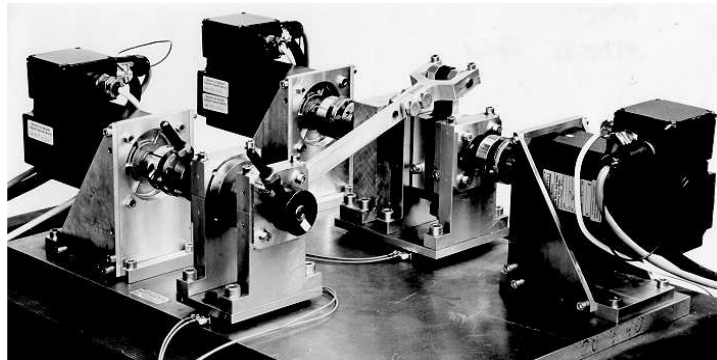


Bild 1: Kurbelschwinge mit Hauptantrieb und zwei redundanten Servomotoren

Technische Universität München

Lehrstuhl B für Mechanik

Leitung: Univ.Prof. Dr.-Ing. F. Pfeiffer
Arcisstraße 21, D-80 290 München, Tel.: (089) 289-15 200, Fax: (089) 289-15 213

Bitte wenden Sie sich an:
Dr.-Ing. Th. Thümmel, Tel. (089) 289-15 205, email: thuettel@lbm.mw.tu-muenchen.de

4.2 Laufroboter

Die am Institut entwickelten Laufmaschinen wurden auf einer Vielzahl von Messen und Ausstellungen präsentiert:

- **Hannover Messe** Hannover, April 1994; April 2003
- **Messe electronica** München, 1994
- **Körber Preis** Hamburg, 7.-8.9.1997, organisiert durch Körber-Stiftung
- **“Fest für Ideen”** Besuch bei Bundespräsident Roman Herzog, Berlin, 12.9.1997, organisiert durch Bundespräsidialamt
- **Ausstellung “Bionik”** München, 25.05.-28.08.1998, organisiert durch Landesmuseum für Technik und Arbeit, Mannheim
- **Stern TV** live-Sendung mit Günther Jauch, Köln, 14.10.1998, G+J Funk- und Fernsehproduktions GmbH
- **International Scientific Research and Technology Meeting, 11th Edition** Turin, 23.-24.10.1998, organisiert durch Italgas S.p.A.
- **Ausstellung “Bionik”** Berlin, 24.02.-18.06.1999, organisiert durch Landesmuseum für Technik und Arbeit, Mannheim
- **IARP Workshop “Biologically Motivated Service Robotics”** Jena, 21.-23.06.1999, organisiert durch Friedrich-Schiller-Universität Jena und Jenoptik AG
- **INTERKAMA 1999** Düsseldorf, 18.-23.10.1999, organisiert durch Messe Düsseldorf GmbH
- **Millenniumsfeier TU-München** Garching, 20.11.1999, organisiert durch TU-München



Sechsbeinige Laufmaschine

Die Ausnutzung biologischen Wissens für technische Systeme beinhaltet ein großes Potential für zukünftige, intelligentere Reglerstrukturen. Die Anlehnung an biologische Prinzipien löst gerade im Bereich laufender Roboter eine Vielzahl von dynamischen und regelungstechnischen Problemen.

Die sechsbeinige Laufmaschine des Lehrstuhls (siehe Abb. 1) besitzt aus diesem Grunde eine Beingeometrie, welche Biegebelastungen während des Laufens minimiert. Die Achsgeometrie ist nicht kartesisch, die Orientierungen der Drehachsen sind identisch mit jenen der Stabheuschrecken *Carausius morosus*. Mit Hilfe einer Computersimulation der Dynamik dieser Insekten wurde die Optimalität dieser Achsanordnungen nachgewiesen.

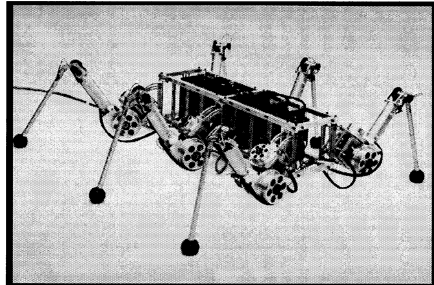


Abb. 1: Die sechsbeinige Laufmaschine

Ein zentrales konstruktives Problem bei technischen Laufmaschinen ist durch das Verhältnis Nutzlast zu Eigengewicht charakterisiert. Während Insektenbeine Tragkräfte ausüben,

die über dem hundertfachen Beingewicht liegen, können übliche Industrieroboter nur etwa ein Zwanzigstel ihres Eigengewichtes bewegen. Die Gelenkkonstruktion der Laufmaschine ist daher eine gewichts- und drehmomentoptimierte Kombination eines Neodym-Bor Gleichstrommotors und eines Harmonic-Drive-Getriebes (siehe Abb. 2). Das Gesamtgewicht eines Einzelbeins mit drei Segmenten und drei angetriebenen Achsen liegt bei 2,9 kg; die Segmentlängen betragen 6, 25 und 35 cm. Das maximale Antriebsmoment auf das zweite Gelenk, welches im wesentlichen die Gewichtskraft kompensiert, beträgt über 60 Nm. Die vorliegende Beinkonstruktion besitzt somit das hohe Tragkraft zu Eigengewichts - Verhältnis von 6:1. Eine weitere Be-

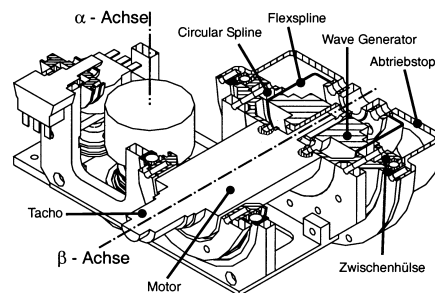


Abb. 2: Schnittbild eines Beingelenks

sonderheit der Laufmaschine liegt in der dreischichtigen Reglerstruktur, deren oberste Ebene, die Ebene der Beinkoordination (Abb. 3), nach biologischen Prinzipien funktioniert. Aus biologischen Forschungsarbeiten ist bekannt,

daß nicht etwa eine zentrale Regeleinheit feste Phasenbeziehungen der Beine vorschreibt, sondern statt dessen jedes Bein mit seinen Nachbarbeinen kommuniziert und diesen kleine Veränderungen der Schrittlängen und -geschwindigkeiten "nahelegt", während es selbst im Gegenzug von seinen Nachbarn beeinflusst wird.

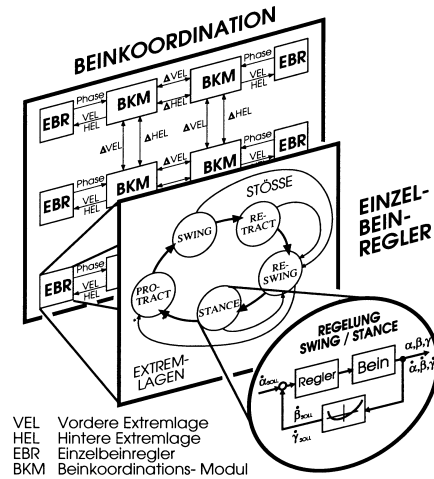


Abb. 3: Reglerstruktur der Laufmaschine

Die dezentrale Regelung wurde direkt in den Nerven der Insekten nachgewiesen und ist in ähnlicher Form in der Laufmaschine implementiert. Sie zeigt erstaunlich robustes Störungsverhalten. Die mittlere Regelungsebene besteht aus sechs identischen Einzelbeinreglern, welche jeweils ein Bein ansteuern und auf Stoßbelastungen, Hindernisse und eventuelles Ausrutschen reagieren.

Treten in den Beinsegmenten Stoßbelastungen durch Hindernisse auf, entstehen Spannungsspitzen in den Dehnmeßstreifen. Die Einzelbeinregler "reagieren" dann durch kur-

zes Zurückziehen der Beine und durch einen neuen Schritt mit höherer Bodenfreiheit. Diese Ebene ist als "finite state machine" realisiert, d.h. die Sensorinformationen dienen als Indikatoren, von deren Auswertung die Übergänge zwischen den möglichen Phasen (Luftphase, Bodenphase, Ausweichen, Aufsetzen, Abheben) abhängen. Die untere Reglerebene beinhaltet einen PID-Gelenkregler, der die beiden äußeren Gelenkwinkel in Abhängigkeit von der Bein-Schwenkbewegung ansteuert.

Damit maximale Autonomie des Roboters gewährleistet ist, befindet sich die gesamte Sensorik (18 Winkelgeber, 18 Tachometer, 6 Dehnmeßstreifen, 6 Kontaktsensoren), die Leistungselektronik für 18 Motoren (32 V, je 10 Amper max.) und die gesamte Regelelektronik (6 Mikrocontroller SIEMENS SAB 80C166) an Bord der Maschine.

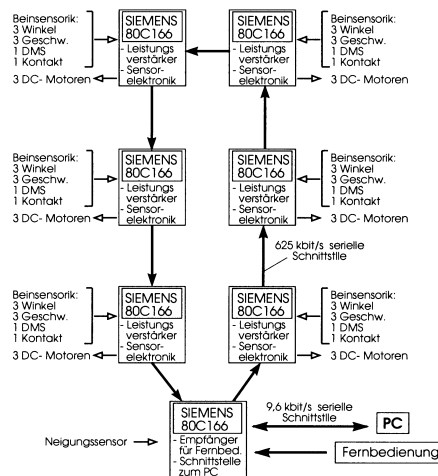


Abb. 4: Anordnung der Beinrechner

Technische Universität München
Lehrstuhl B für Mechanik
 Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. F. Pfeiffer
 Boltzmannstr. 15, D-85747 Garching
 Tel.: (089)289-15200, Fax: (089)289-15213
 Ansprechpartner: Dipl.-Ing. M. Gienger, Dipl.-Ing. K. Löffler
 email: loeffler@ibm.mw.tu-muenchen.de



Der Rohrkrabbler

Der "Rohrkrabbler" des Lehrstuhls B für Mechanik stellt eine Studie dar, mit der Möglichkeiten von laufenden Robotern für Rohre untersucht und Regelungsstrukturen für derartige Systeme erarbeitet werden sollen. Der Bereich der Rohrinspektion stellt ein wichtiges Anwendungsgebiet für Robotersysteme dar. Insbesondere gibt es einen großen Bedarf im Bereich der Sanierung städtischer Abwassersysteme, in der Erdölindustrie und im Bereich der Chemieanlagen. Im allgemeinen können Roboter, die sich ähnlich wie biologische Lebewesen auf Beinen fortbewegen, in wesentlich schwierigerem Gelände als radgetriebene Systeme arbeiten. Dabei erfordert die Koordination und Regelung der Beine jedoch eine wesentlich aufwendigere Reglerarchitektur als bei herkömmlichen Transportsystemen.

Der Roboter hat ein Gesamtgewicht von 21 kg und kann sich in Rohren beliebiger Steigung einschließlich horizontalen und vertikalen Rohren fortbewegen. Die Konstruktion ist für Rohrdurchmesser von 600 bis 700 mm geeignet. Wie in Abbildung 1 dargestellt, besteht

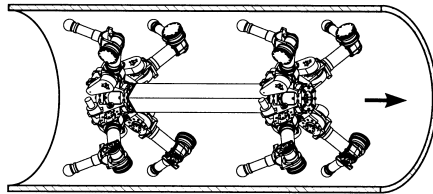


Abbildung 1: Rohrkrabbler

der Roboter aus einem Zentralkörper, der die Mikrocontroller und die Leistungselektronik trägt und acht Beinen, mit denen sich der Roboter fortbewegt. Die Beine sind in zwei Ebenen

angeordnet. Jedes Bein verfügt über zwei Freiheitsgrade, die über Gleichstrommotoren in Verbindung mit Harmonic Drive Getrieben angetrieben sind. Dabei können die Antriebseinheiten ein maximales Drehmoment von 78 Nm generieren. Die Gelenke sind mit Potentiometern und Tachometern ausgestattet, um die Drehlage und Winkelgeschwindigkeit zu messen. Um ein Abrutschen des Roboters im Rohr zu verhindern, müssen neben den kinematischen Sensordaten auch die Kräfte gemessen werden, die auf die Beinendpunkte wirken. Jedes Bein ist mit fünffachsigen Kraft- bzw. Momentensensoren ausgestattet, mit denen Größe und Richtung der Kontaktkräfte ermittelt werden können. Abbildung 2

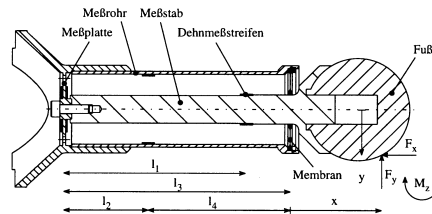


Abbildung 2: Kraftsensor

zeigt die Konstruktion der äußeren Beinsegmente, in denen 12 Dehnmeßstreifen zur Kraftmessung integriert sind.

Die implementierte Kraftregelung stellt sicher, daß die Beinkräfte hoch genug sind, so daß der Roboter nicht abrutscht. Die Regelungsalgorithmen werden von 5 Mikrocontrollern verarbeitet, die lokal auf dem Roboter installiert sind. Vier dieser Controller werden für die Regelung der einzelnen Beine verwendet, während ein zentraler Rechner das Verhalten des Gesamtsystems koordiniert. Die Prozessoren sind über ein CAN-Bus System mit-

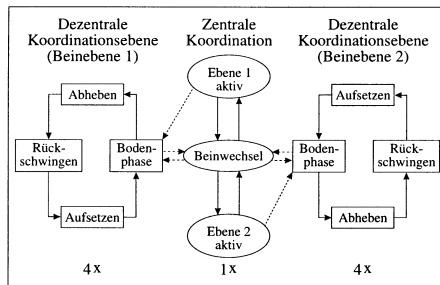


Abbildung 3: Koordinationsebenen

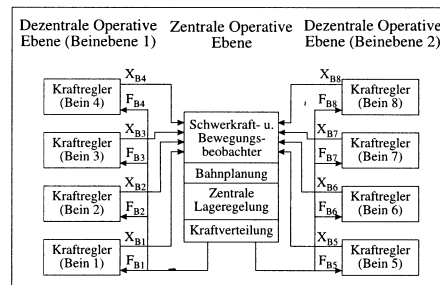


Abbildung 4: Operative Ebenen

einander verbunden, welches auch die Kommunikation mit einem externen PC realisiert. Der PC dient zur Übergabe von Bedienanweisungen und zur Überwachung des Roboters. Entsprechend der Konstruktion des Roboters gliedert sich die Regelung in eine zentrale Ebene, die das Gesamtsystem betrifft, und eine lokale Ebene, die sich auf die Regelung einzelner Beine bezieht. Auf beiden Ebenen wird unterschieden zwischen koordinativen Aufgaben, die die Abfolge der Phasen im Gangmuster betreffen, und operativen Aufgaben, die die Kraft- bzw. Lageregelung innerhalb der einzelnen Phasen umfassen (siehe Abbildungen 3 und 4).

Das Gangmuster wird über eine koordinierte Abfolge der Phasen "Boden", "Abheben", "Rückschwingen" und "Aufsetzen" realisiert, wobei die Phasenwechsel von den lokalen Beinreglern eingeleitet werden. Bei der Fortbewegung im Rohr ist zusätzlich eine zentrale Koordination aller Beine erforderlich, so daß sichergestellt ist, daß immer mindestens vier Beine Kontakt zur Wand haben, während die anderen vier zu ihrem nächsten Kontaktpunkt schwingen. Die Koordination dieser beiden Beinebenen erfolgt auf der zentralen Koordinationsebene.

Während die koordinativen Aufgaben die Phasen der Beine und der Beinebenen betreffen, werden die Trajektorien der Beine und die

Beinkräfte mit der operativen Regelung festgelegt. Auf der zentralen Ebene beziehen sich die operativen Aufgaben auf die Lageregelung des Zentralkörpers. Wie in Abbildung 4 dargestellt, wird die Lage des Zentralkörpers mit Beobachtern ermittelt und mit einer Referenzbahn verglichen. Daraus läßt sich der erforderliche Gesamtvektor aller Beinkräfte ermitteln, so daß der Roboter auf die vorgegebene Bahn einschwingt. Die zentrale Ebene verteilt die entsprechende Gesamtkraft auf alle tragenden Beine. Dazu ist im allgemeinen eine Optimierung erforderlich, in der die Reibzustände und die Lagen der Beine berücksichtigt werden, so daß kein Bein zu rutschen beginnt. In einer unbekannten Rohrgeometrie ist es erforderlich, die Orientierung der Wand relativ zum Roboter durch Antasten zu bestimmen, um die optimale Kraftverteilung ermitteln zu können. Die resultierenden Sollkräfte werden dann an die operative Ebene der jeweiligen Einzelbeinrechner weitergegeben. Nach der Methode der "Feedback Linearization" werden auf Ebene einzelner Beine die Drehmomente bzw. Motorspannungen für jedes angetriebene Gelenk bestimmt, wobei die gesamte Dynamik des Roboters berücksichtigt wird.

Im praktischen Versuch wurde die Stabilität und Robustheit der implementierten Regelung verifiziert.

Technische Universität München

Lehrstuhl B für Mechanik

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. F. Pfeiffer
Boltzmannstr. 15, D-85747 Garching
Tel.: (089)289-15200, Fax: (089)289-15213
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. M. Gienger, Dipl.-Ing. K. Löffler
email: loeffler@lbm.mw.tu-muenchen.de

Ausstellungen zweibeinige Laufmaschine JOHNNIE

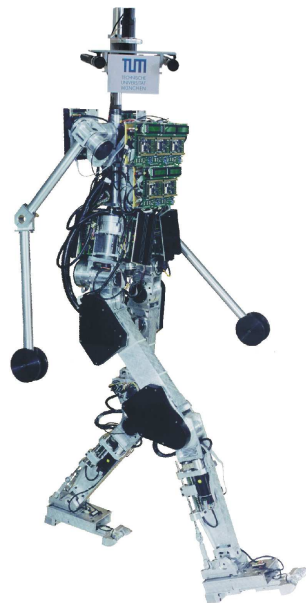
Intelligenter Laufroboter Johnnie



Prof. Dr.-Ing. habil.
Heinz Ulbrich
Prof. Dr.-Ing.
Friedrich Pfeiffer i. R.

HANNOVERMESSE 2003, Halle 18, Stand H11

Laufende Maschinen faszinieren die Menschen seit Jahrhunderten. In den siebziger Jahren begannen zahlreiche Forschungsgruppen, sich weltweit mit der Realisierung laufender Roboter auseinanderzusetzen. Durch die rasante Entwicklung von Aktorik, Sensorik und Rechenleistung ist man heute in der Lage, komplexe laufende Maschinen zu entwickeln.



sich um die Hochachse drehen, ferner werden die Arme zum dynamischen Drallausgleich eingesetzt. Sie verfügen über je zwei Freiheitsgrade in den Schultern. Alle Gelenke werden mit Gleichstrommotoren angetrieben und mit Leichtbaugetriebenen (Harmonic Drive, Kugelumlaufspindeln) unteretzt. Die Struktur des Roboters besteht weitgehend aus hochfesten Aluminium-Legierungen. Neben den

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes "Autonomes Laufen" beschäftigt sich der Lehrstuhl für Angewandte Mechanik der TU München mit der Realisierung der zweibeinigen autonomen Laufmaschine "Johnnie". Der Roboter ist in der Lage, auf ebenem und unebenem Boden sowie um Kurven zu gehen. Primäres Ziel ist das Erreichen eines schnellen, dynamisch stabilen Ganges. Dies stellt erhebliche Anforderungen an Antriebe, Sensoren und Regelungstechnik.

Der Roboter verfügt über einen menschenähnlichen Aufbau mit 17 angetriebenen Gelenken bei einer Körpergröße von 1,8m und einem Gewicht von etwa 40kg. In jedem Bein befinden sich sechs Gelenke, davon drei in der Hüfte, eines im Knie sowie zwei im Sprunggelenk. Der Oberkörper kann

Antrieben sind Sensorik, Elektronik und Rechner auf der Maschine integriert, so dass Johnnie über ein hohes Maß an Autonomie verfügt. Lediglich die Energie wird über ein Kabel zugeführt.

Zur Vermeidung elektromagnetischer Störungen kommen vorwiegend digitale Sensoren zum Einsatz. Lage und Geschwindigkeit der Gelenke werden mit inkrementellen Winkelencodern gemessen. Die Ermittlung der Bodenaufstandskräfte übernehmen zwei in den Füßen integrierte sechsschichtige Kraftsensoren. Ein Orientierungssensorsystem bestehend aus einem dreiachsigen Accelerometer und drei Kreisel Sensoren erfasst die räumliche Drehlage des Oberkörpers. Sensoren und Motorleistungsstufen sind über ein I/O-Board mit dem On-Board-PC verbunden (Pentium IV 2,8GHz).

Lehrstuhl für Angewandte Mechanik • Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. H. Ulbrich
TU München • Fakultät f. Maschinenwesen • Boltzmannstr. 15 • 85748 Garching
Tel.: ++49(0)89/289-15199 Fax: -15213 Internet: <http://www.amm.mw.tum.de>



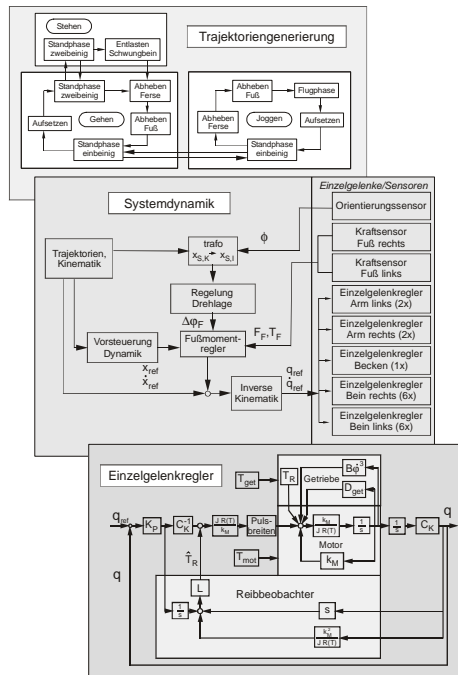


Bild 1: Regelungsstruktur

Eine weitere Besonderheit der Maschine liegt im Regelungskonzept, welches in drei Ebenen untergliedert ist. Auf der obersten Ebene werden die Trajektorien der Maschine berechnet. Dabei wird zwischen den Gangmustern Stehen, Gehen und Joggen umgeschaltet. Jedes dieser Gangmuster setzt sich aus unterschiedlichen Phasen zusammen (Standphase, Schwungphase, ...). Dabei darf der berechnete Schritt nicht zu einem unbeabsichtigten Abheben oder Kippen des Standfußes führen. Um dies zu verhindern, werden optimierte Schrittparameter aus Tabellen gelesen, die zuvor mit einem umfassenden mechanischen Ersatzmodell der Maschine erzeugt wurden. Die Regelung der Dynamik des Roboters erfolgt auf der zweiten Ebene, die es der Maschine ermöglicht das "Gleichgewicht zu halten". Auch bei ideal vorgegebenen Trajektorien können Abweichungen der Drehlage des Oberkörpers auftreten, die aus Bodenunebenheiten oder äußerer Krafteinwirkung resultieren. Diese Abweichungen werden über den Orientierungssensor gemessen und die Bewegung der Maschine wird so angepasst, dass sich der Oberkörper wieder aufrichtet. Die Reaktion des Roboters erfolgt dabei anhand eines vereinfachten dynamischen Modells der Maschine, das in Echtzeit berechnet werden kann. Gleichzeitig stellt eine Kraft-

Momentenregelung sicher, dass die Füße eben auf dem Boden bleiben, wodurch die Steuerbarkeit der Maschine sichergestellt ist. Die resultierende Bewegung des Roboters wird auf die einzelnen Gelenke abgebildet, die auf der untersten Ebene unabhängig geregelt werden. Für jedes Gelenk wird der Sollverlauf der Lagen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen und einen PID-Regler mit Reibbeobachter übergeben, der sicherstellt, dass die gewünschte Bewegung eingehalten wird.

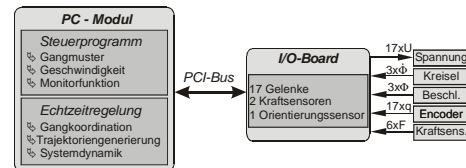


Bild 2: Systemschaltbild

Das Regelungskonzept wurde intensiv unter Verwendung eines Mehrkörper-Simulationsprogrammes untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl Stehen, Gehen und Joggen stabil geregelt sowie Störungen effizient ausgeglichen werden. Johnnie erreicht eine Gehgeschwindigkeit von ca. 2km/h, was derzeit eine Höchstleistung im Bereich zweibeiniger Roboter darstellt. Für die Zukunft ist geplant, schnelleres Gehen und "Joggen" mit kurzen Flugphasen zu erzielen.

Auf der Hannovermesse 2003 wird Johnnie sichtgesteuert über ein Hindernisszenario laufen. Mit dem Sichtsystem des Lehrstuhls für Steuerungs- und Regelungstechnik der TU München ist der Roboter in der Lage, Hindernisse zu erkennen und geeignete Schrittsequenzen zu planen, um diese zu übersteigen oder zu umgehen. Das Forschungsvorhaben wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogrammes „Autonomes Laufen“ finanziert.

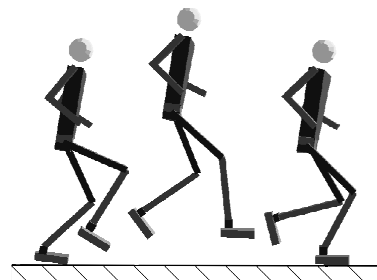


Bild 3: Animation zum Joggen

Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, TU München
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching
Tel.: ++49(0)89/289-15199
Internet: <http://www.amm.mw.tum.de>



Ansprechpartner:
Prof. Dr.-Ing. F. Pfeiffer
Dr.-Ing. Th. Thümmel
Dipl.-Ing. K. Löffler
Dipl.-Ing. M. Gienger

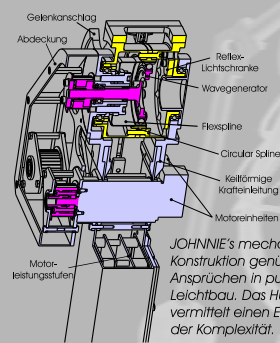
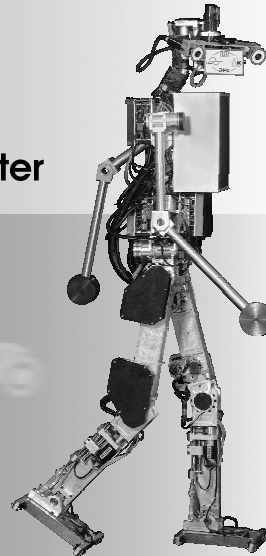
JOHNNIE: Der zweibeinige Roboter

Mechatronik „live“ – 1,80 Meter groß und gelenkig

Er besteht aus über 1.000 Einzelteilen und wiegt 43 Kilogramm: JOHNNIE ist ein mobiler Roboter. 17 Gelenke ermöglichen ihm einen menschenähnlichen Gang. Mit seinem Sichtsystem nimmt er die Umgebung wahr, erkennt Hindernisse und Treppenstufen.

Neueste Entwicklungen der Mechatronik machen es möglich, derart komplexe Laufmaschinen zu bauen. Denn das Laufen stellt erhebliche Anforderungen an die Regelungstechnik. In die Weiterentwicklung von JOHNNIE sollen auch Forschungsergebnisse aus Biologie und Neurobiologie einfließen.

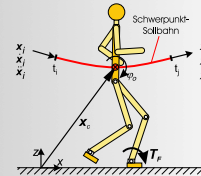
JOHNNIE wurde im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Autonomes Laufen“ (Sprecher: Prof. F. Pfeiffer) entwickelt, an dem der Lehrstuhl für Angewandte Mechanik und der Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik (Prof. G. Schmidt) der TU München beteiligt waren.



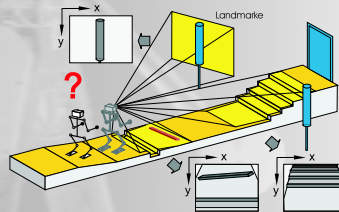
JOHNNIE's mechanische Konstruktion genügt höchsten Ansprüchen in puncto Leichtbau. Das Hüftgelenk vermittelt einen Eindruck von der Komplexität.



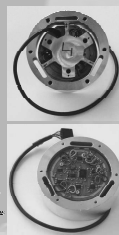
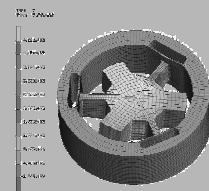
Ein Projektziel ist Joggen mit kurzen Luftphasen (hier in der Simulation). Angestrebt wird eine Geschwindigkeit von 5 km/h.



JOHNNIE ist weit gehend autonom: Ein Onboard-PC regelt die Systemdynamik. Lediglich die Energie wird von aussen zugeführt.



Mit dem Sichtsystem nimmt JOHNNIE seine Umwelt wahr. Er erkennt Hindernisse und Treppenstufen, und passt seine Schrittsequenzen an.



JOHNNIE besitzt Gelenksensoren und einen Gleichgewichtssensor. Kraftsensoren in den Füßen messen die Bodenreaktionskräfte.

JOHNNIE: Der zweibeinige Roboter

Laufende Maschinen faszinieren die Menschen seit Jahrhunderten. Ende der sechziger Jahre begannen weltweit zahlreiche Forschungsgruppen, sich mit der Realisierung laufender Roboter auseinanderzusetzen. Durch die rasante Entwicklung von Aktorik, Sensorik und Computertechnik ist man heute in der Lage, komplexe laufende Maschinen zu entwickeln. Der Schwerpunkt der Laufmaschinenforschung liegt traditionell in Japan, wo mehrere anspruchsvolle humanoide Roboter entwickelt werden. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1039 "Autonomes Laufen" beschäftigt sich der Lehrstuhl für Angewandte Mechanik mit der Realisierung der zweibeinigen, autonomen Laufmaschine JOHNNIE. Der Roboter ist in der Lage, auf ebenem und unebenem Boden sowie um Kurven zu gehen. Primäres Ziel ist das Erreichen eines schnellen, dynamisch stabilen Ganges. Dies stellt erhebliche Anforderungen an Antriebe, Sensoren und Regelungstechnik.

Auf der Hannovermesse 2003 ist JOHNNIE sichtgesteuert über ein Hindernisszenario gelaufen. Mit dem Sichtsystem des Lehrstuhls für Steuerungs- und Regelungstechnik der TU München ist der Roboter in der Lage, Hindernisse zu erkennen und geeignete Schrittsequenzen zu planen, um diese zu übersteigen oder zu umgehen.

Systemstruktur

JOHNNIE verfügt über einen menschenähnlichen Aufbau mit 17 angetriebenen Gelenken bei einer Größe von 180 cm und einem Gewicht von etwa 43 kg. In den Beinen befinden sich jeweils sechs Gelenke, davon drei in der Hüfte, eines im Knie sowie zwei im Sprunggelenk. Der Oberkörper kann sich um die Hochachse drehen, ferner werden die Arme zum dynamischen Drahtausgleich eingesetzt. Zu diesem Zweck verfügen die Schultern über je zwei Freiheitsgrade. Alle Gelenke werden mit bürstenbehafteten Gleichstrommotoren in Verbindung mit Harmonic Drive-Leichtbaugetrieben angetrieben; eine Ausnahme bilden die Sprunggelenke, die über einen Parallelmechanismus aus Kugelumlaufspindeln verfügen. Die Struktur des Roboters besteht zum großen Teil aus hochfesten Aluminium-Legierungen. Neben den Antrieben sind Sensorik, Elektronik und Rechner auf der Maschine integriert, sodass JOHNNIE über ein hohes Maß an Autonomie verfügt. Lediglich die Energie wird über ein Kabel zugeführt. Gelenkpositionen und -geschwindigkeiten werden mit Inkrementellen Winkelencodern gemessen. Die Ermittlung der Bodenaufstandskräfte übernehmen zwei in die Füße integrierte, sechssachsigte Kraftsensoren. Ein Orientierungssensorsystem, bestehend aus einem dreiachsigem Beschleunigungssensor und drei Kreisel-sensoren erfasst die räumliche Drehlage des Oberkörpers. Sensoren und Motorleistungsstufen sind über eine spezielle Schnittstellenkarte mit einem PC verbunden (Pentium IV 2,8GHz), der auf dem Oberkörper des Roboters montiert ist.

Regelung des Roboters

Gemäß Abbildung 1 ist die Regelung des Roboters in zwei Ebenen unterteilt. Auf der obersten Ebene erfolgt die globale Gangkoordination einschließlich des Übergangs zwischen den verschiedenen Gangmustern. Beispielsweise sind spezielle Gangmuster für Stehen, Gehen und Treppensteigen programmiert. Jedes dieser Gangmuster setzt sich aus unterschiedlichen Phasen zusammen (z.B. Standphase, Schwungphase). Dabei darf der berechnete Schritt nicht zu einem unbeabsichtigten Abheben oder Kippen des Standfußes führen. Um dies zu verhindern, werden optimierte Schrittparameter aus Tabellen gelesen, die zuvor mit einem umfangreichen mechanischen Ersatzmodell der Maschine erzeugt wurden. Diese Referenztrajektorien erfüllen die dynamischen Randbe-

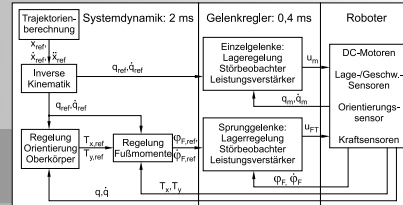


Abbildung 1: Regelungsstruktur

dingungen des Systems. Daher ist der Roboter im Gleichgewicht, solange die Gelenkwinkel den Referenztrajektorien exakt folgen. Dies ist jedoch bei für sehr langsamen Geschwindigkeiten der Fall. In der Realität treten Abweichungen der Drehlage auf, die aus Bodenunebenheiten oder äußerer Krafteinwirkung resultieren. Bereits kleinste Störungen würden den Roboter innerhalb weniger Schritte aus dem Gleichgewicht bringen. Deshalb ist eine Adaption der Trajektorien zur Laufzeit erforderlich. Diese Abweichungen werden mit dem Orientierungssensor gemessen und die Bewegung der Maschine so angepasst, dass sich der Oberkörper wieder aufrichtet. Die Reaktion des Roboters erfolgt dabei anhand eines vereinfachten dynamischen Modells der Maschine, das in Echtzeit berechnet werden kann. Gleichzeitig stellt eine Momentenregelung sicher, dass die Füße eben auf dem Boden bleiben, wodurch die Steuerbarkeit der Maschine sichergestellt ist. Die resultierende Bewegung des Roboters wird auf die einzelnen Gelenke abgebildet, die auf der untersten Ebene unabhängig geregelt werden. Für jedes Gelenk wird der Sollverlauf der Lagen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen an einen PID-Regler mit Reibbeobachter übergeben. Er stellt sicher, dass die gewünschte Bewegung eingehalten wird. Läuft JOHNNIE mit Hilfe des Sichtsystems autonom, übernimmt eine zusätzliche, übergeordnete Reglerebene die vorausschauende Adaption der Gangmuster an die aktuellen Umweltgegebenheiten.

Das Regelungskonzept wurde intensiv unter Verwendung eines Mehrkörper-Simulationsprogramms untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl Stehen, Gehen und Joggen stabil geregelt, sowie Störungen effizient ausgeglichen werden. Die maximale Geschwindigkeit beträgt derzeit 2,4 km/h bei einer Schrittlänge von 55 cm.

Im Nachfolgeprojekt wird die Reglerarchitektur erweitert und die Gangmuster flexibler gestaltet. Der Roboter wird mit leistungsfähigeren Antrieben ausgestattet und das Sensorsystem überarbeitet. Damit sollen höhere Geschwindigkeiten erreicht und die Autonomie gesteigert werden.

Lehrstuhl für Angewandte Mechanik

TU München, Fakultät für Maschinenwesen
Boltzmannstr. 15
85748 Garching
Tel. (089) 289-15199
<http://www.amm.mw.tum.de/>

Ansprechpartner

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Heinz Ulbrich
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Friedrich Pfeiffer i.R.
Dipl.-Ing. Thomas Buschmann
Dipl.-Ing. Sebastian Lohmeier

5 Internationale Kollegen und Doktoranden

- AvH-Preisträger:
 - Prof. George Leitmann, Berkeley, USA, Mai - Juli 1996
 - Prof. Felix Chernousko, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 01.11.1998-28.02.1999, 01.07.1999-30.09.2000, 01.02.2000-30.04.2000, 01.12.2000-28.02.2001, 01.12.2004-28.02.2005
 - Prof. Jorge Angeles, Dept. Mechanical Engineering, McGill, Montreal, Juli 1991 - Juni 1992
 - Prof. Vladimir Beletzky, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moskau, Mai 1993 - April 1994, September 1998 - November 1998
- AvH-Research Fellow:
 - Dr. Dimitry M. Gorinevsky, Academy of Sciences of the USSR, Inst. for Problems of Information/Transmission, Moscow, UdSSR, Mai 1991 - Oktober 1992
 - Prof. Dr. Zhong-Sheng Liu, Jilin University of Technology, Department of Mechanics, Changchun, VR China (über Berkeley), September - Dezember 1995 (LBM + Goethe-Institut), Januar - Dezember 1996 (LBM)
 - Dr. Wen Chen, Tsinghua University, Beijing, VR China, Juni 1995 - Juni 1996
- Doktoranden:
 - Zheng Shuiying, Zhejiang University, Hangzhou, VR China, Bezahlung über DAAD, 01.04.1989-31.03.1993
 - Mingmin Ren, VR China, Bezahlung durch Firma CYCLO, 01.05.1987-28.02.1991
 - Kurt R. Wölfl, Stanford/USA, Mai 1991 - Dezember 1994
 - Thomas H. Connally, Irvine/USA, Mai 1991 - Dezember 1994
 - Ilmar Feirreira Santos, Campinas Brasilien, 01.10.1989 - 31.03.1993
 - Dr. Weixing Wu, Arshan, Liaoling, VR China, jetzt Kanada, 01.04.1994-31.07.1999
 - Henner Wapenhans, Washington D.C./USA, April 1989 - September 1993

- Kostas Kariagiannis, Trikala GR, Oktober 1985 - Januar 1990
- Gäste:
 - Jerzy Trebicki, Institute of Fundamental Technological Research, Warsaw, Poland, Bezahlung über DAAD-Stipendium, 1992-1993
 - Dipl.-Ing. K. Ramesha Babu, BEML, A. Bharathway, BEML, UNO-Austausch, Mai - Juli 1995
 - Dipl.-Ing. Figueiredo Joao, Dep. Eng. Mecanica - Seccao Sistemas, Instituto Superior Tecnico, Lisboa, Portugal, Bezahlung über Portuguese Research Council (JNICT), Oktober 1991 - August 1992
 - Prof. Horie Mokio, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan, Bezahlung über Tokyo Inst. (Forschungsgast), 1996-1997
 - Lionel Lapierre, a Ph. D., Student from LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier, France, 01.09.-15.12.1997
 - Prof. Dr. Francis C. Moon, Sibley School of Mechanical and Aerospace Eng., Ithaca, New York, USA, Forschungsaufenthalt, Bezahlung über SFB 365 als freier Mitarbeiter (Prof. Höhn / Prof. Pfeiffer), September - November 1994
 - Prof. Zheng Zhaochang, Tsinghua University, Beijing, VR China, Bezahlung über Lehrstuhl B für Mechanik , Mai - August 1996
 - Frau Prof. Feng Qi, Tong Ji University Shanghai, 2000 Bezahlung über KAAD, 2001 Bezahlung über DAAD, Bezahlg. über KAAD, Forschungsaufenthalt, August 1993 - März 1994
 - Dipl.-Ing. Gálvez José Antonio, Madrid, Spanien, Bezahlung über DAAD und DFG, Mai 1998 - Mai 1999
 - Remco J. Leine, University of Technology, Eindhoven, NL, Bezahlung über NWO Technology Foundation, NL, November 2000 - April 2001
 - Dr. Jose Luis Pons Rovira, Instituto de Automática Industrial del CSIC, Dpto. de Sistemas, Arganda del Rey, Spain, Bezahlung über DFG, Juli - August 2000
 - Ass. Prof. Dr. Eng. Yukio Takeda, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, Bezahlung über Tokyo Inst. of Technology, April - September 2000
 - Vesperstrom Jakob, Student, University of Aarhus, Denmark, Bezahlung über Mechanik B (1.000,- DM/Monat), Juli - August 2001
 - Zu Jingrong, Oktober 1989

- Jean Claude Piedboeuf, Montreal/Kanada, August 1989 - Juli 1990
- Prof. V. I. Babitzki, Moskau/Russland, 1989-1990
- Xixuan Wang, VR China, Juli - September 1990
- Dr. Margit Kovácsné Bende, Budapest/Ungarn, Bezahlung über DAAD, 01.10.1990 - 31.07.1991
- Prof. Dr. Liu Yanzhu, Shanghai VR China, Bezahlung über DAAD, April - Juli 1991
- Gosborn Anne Dipl.-Ing., Norfolk, VA, USA, Bezahlung über DFG, 01.10.1998-31.12.1998

6 Einige ausgewählte Veröffentlichungen

Eine vollständige Liste aller Lehrstuhl-Veröffentlichungen findet man unter:
<http://www.amm.mw.tu-muenchen.de/> → Personen → Friedrich Pfeiffer.

Pfeiffer, F.: Mechanische Systeme mit unstetigen Übergängen, Ingenieur-Archiv 54 (1984) , 223-240.

Pfeiffer, F.; Johanni, R.: A Concept for Manipulator Trajectory Planning - In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 1986, San Francisco, California, IEEE Computer Society Press, S. 1399-1405.

Pfeiffer, F.: On Unsteady Dynamics in Machines with Plays - In: Proc. of the 7th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Sevilla, Spain, 17-23 September 1987, Vol. 1, S. 417-423.

Pfeiffer, F.; Reithmeier, E.: Roboterdynamik, Teubner- Verlag, 1987, Teubner Studienbücher Mechanik.

Pfeiffer, F.: Theorie des Getrieberassels. - In: VDI Berichte Nr. 697, 1988, S. 45-65.

Pfeiffer, F.; Gebler, B.: A Multistage-Approach to the Dynamics and Control of Elastic Robots - In: Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Volume 1, Philadelphia, Pennsylvania, April 24-29, 1988.

Pfeiffer, F.: A Feedforward Decoupling Concept for the Control of Elastic Robots - In: Journal of Robotic Systems, 6(4), 1989, pp. 407-416.

Pfeiffer, F.: Einführung in die Dynamik. Leitfäden der angewandten Mathematik und Mechanik Bd. 65, Teubner Studienbücher Mechanik, Stuttgart, 1989.

Pfeiffer, F.: Optimal Trajectory Planning for Manipulators. - In: Systems & Control Encyclopedia, Supplementary Vol. 1. Edt. M. G. Singh. Oxford: Pergamon Press, 1990.

Pfeiffer, F.: Path and Force Control of Elastic Manipulators. - In: Proc. of the 29th Conf. on Decision and Control, Honolulu, HI, USA, Dec. 5 - 7, 1990, pp. 514-519.

- Pfeiffer, F.; Richter, K.:** Optimal Path Planning Including Forces at the Gripper. - In: Journal of Intelligent Robotic Systems, 3, 1990, pp. 251-258.
- Pfeiffer, F.:** Dynamical Systems with Time-Varying or Unsteady Structure. - In: ZAMM Zeitschrift f. angew. Math. u. Mech. 71 (1991) 4, Akademie-Verlag Berlin, pp. T6-T22.
- Pfeiffer, F.:** Combined Path and Force Control for Elastic Manipulators. - In: Mechanical Systems and Signal Processing (1992) 6(3), pp. 237-249.
- Pfeiffer, F.:** On Stick-Slip Vibrations in Machine Dynamics - In: Machine Vibration (1992) 1, Springer Verlag London Ltd., pp. 20-28.
- Pfeiffer, F.; Glocker, Ch.:** Dynamical Systems with Unsteady Processes. - In: Proc. of the Winter Annual Meeting of the ASME, Anaheim, CA, USA, Nov. 8-13, 1992, DE-Vol. 49, Friction-Induced Vibration, Chatter, Squeal and Chaos, pp. 685-687.
- Pfeiffer, F.; Seyffarth, W.:** On Unsteady Dynamics of Assembly Processes. - In: Proc. of ISRAM 92, 4th Intl. Symp. on Robotics and Manufacturing, Santa Fe, NM, USA, Nov. 11-13, 1992, pp. 831-838.
- Pfeiffer, F.:** Methoden zur nichtlinearen Antriebstechnik. - In: VDI Berichte, Nr. 1153, 1994, S. 599-624.
- Pfeiffer, F.:** Complementary Problems of Stick-Slip Vibrations. - In: DE-Vol. 56, Dynamics and Vibrations of Time-Varying Systems and Structures, Eds.: S.C. Sinha et al., pp. 43-50.
- Pfeiffer, F.:** Unsteady processes in machines. - In: Chaos, Vol. 4, No. 4, 1994, pp. 693-705.
- Pfeiffer, F.; Cruse, H.:** Bionik des Laufens - technische Umsetzung biologischen Wissens. - In: Konstruktion 46 (1994) Nr. 7/8. Berlin: Springer Verlag, 1994, pp. 261-266.
- Pfeiffer, F., Weidemann, H.J., Eltze, J.:** The TUM-Walking Machine. - In: Proc. of the ISRAM 1994 Conference, Wailea, Maui, Hawaii, USA, Aug. 14-17, 1994.
- Pfeiffer, F.; Eltze, J.; Weidemann, H.-J.:** Six-legged technical walking considering biological principles. - In: Robotics and Autonomous Systems, Vol. 14, 1995, Eds. F. C. A. Groen and T. C. Henderson, Elsevier, Amsterdam, pp. 223-232.

- Pfeiffer, F.; Hölzl, J. :** Parameter Identification for Industrial Robots. - In: Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, May 22-27, 1995, pp. 1468-1476.
- Pfeiffer, F.:** Complementarity Problems of Stick-Slip Vibrations. - In: J. of Vibration and Acoustics, Vol. 118, April 1996, pp. 177-183.
- Pfeiffer, F.:** Cooperating Fingers - A Special Form of Cooperating Robots. - In: Proc. of World Automation Congress (WAC '96), Montpellier, May 28-30, 1996, S. 639-645.
- Pfeiffer, F.:** Grasping with Hydraulic Fingers - An Example of Mechatronics. - In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 2, June 1996, pp. 158-167.
- Pfeiffer, F.:** Rattling in Gears - A Review; - In: VDI Berichte, Nr. 1230, Düsseldorf: VDI- Verlag, 1996, pp. 719-737.
- Pfeiffer, F.:** Robotics in Theory and Practice. - In: ICIAM 95 Proceedings of the Invited Lectures. Mathematical Research. Akademie Verlag, Berlin, 1996.
- Pfeiffer, F.; Glocker, Ch.:** Multibody Dynamics with Unilateral Contacts, New York: John Wiley & Sons Inc. 1996, 317 S.
- Pfeiffer, F.:** Assembly process with robotic systems. Robotic and Autonomous Systems 19, 1996, S. 151-166.
- Pfeiffer, F.:** Multibody Dynamics with Multiple Unilateral Contacts. Proc. of the XIXth International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Kyoto, Japan, 25-31 August 1996 Elsevier, 1997.
- Pfeiffer, F.; Fritz, P.; Srnik, J.:** Nonlinear Vibration in Chains. Journal of Vibration and Control, Vol. 3, 1997, S. 397-410.
- Pfeiffer, F.; Wolfsteiner, P.:** Relative Kinematics of Multibody Contacts. -In: Active/Passive Vibration Control and Nonlinear Dynamics of Structures, DE-Vol. 95, AMD-Vol. 223, Book No. H01110, 1997, S. 107-114.
- Pfeiffer, F.; Glocker, C.:** Solid Mechanics and its Applications 72. Proceedings of the IUTAM Symposium held in Munich, Germany, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- Pfeiffer, F.:** Robots with Unilateral Contacts. -In: Annual Reviews in Control 22. Elsevier Science 1998. pp. 121-132.

- Pfeiffer, F.; Rossmann, T.:** Dynamics and Control of a Tube Crawling Machine. -In: Robotic and Manufacturing Systems, Proc. of the World Automation Congress (WAC '98), Anchorage, Alaska, USA 1998.
- Pfeiffer, F., Rossmann, Th.; Steuer, J.:** Theory and Practice of Machine Walking. -In: CISM Courses and Lectures No. 375, CISM 1997, Springer-Verlag Wien New-York.
- Pfeiffer, F. and Glocker, Ch. (Eds.):** Unilateral Multibody Contacts, Proc. IUTAM-Symp., Munich 1998, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1999.
- Pfeiffer, F.:** Unilateral Problems of Dynamics. Archive of Applied Mechanics 69, pp. 503- 527. Berlin: Springer, 1999.
- Pfeiffer, F.; Steuer, J.:** Design of Walking Machines - Control Aspects - In: Proc. of the 14th World Congress of IFAC, Beijing, China, July 5-9, 1999, pp. 413-418.
- Pfeiffer, F.:** Design Aspects of Walking Machines. Proceedings of the 3rd International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), 2000, Madrid.
- Pfeiffer, F.; Glocker, Chr. (Eds):** Multibody Dynamics with Unilateral Contacts, CISM Courses and Lectures No. 421, Springer Wien New York, 2000.
- Pfeiffer, F.:** Unilateral Multibody Dynamics. Proceedings of the 14th International Conference of Theoretical and Applied Mechanics, AIMETA99, Meccanica34: pp. 437-451, 1999 KLUWER Academic Publishers 2000.
- Pfeiffer, F.; Cruse, H.:** Wie die Technik laufen lernt. forschung - Das Magazin der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), 2-4/2000, S. 21.23, WILEY-VCH, Weinheim.
- Löffler, K.; Gienger, M.; Pfeiffer, F.:** A Biped Jogging Robot - Theory and Realization, Proc. of the 3rd International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), Madrid, Spain, October 2-4, 2000, pp. 51-58.
- Lutzenberger, C.; Pfeiffer, F.:** Analysis of Hemiparetic Gait by Using Mechanical Models. Proceedings of ICMMB'11 - International Conference on Mechanics in Medicine and Biology, April 2-5 2000, Maui, Hawaii, pp. 257-260.
- Pfeiffer, F., Glocker, Ch.:** Contacts in Multibody Systems, J.Appl. Maths Mechs, Vol 64, No. 5, pp. 773-782, 2000, 2001 Elsevier Science Ltd.

- Pfeiffer, F. (Ed.):** Non-smooth Mechanics, A Theme Issue, Philosophical Transactions of the Royal Society, vol. 359, number 1789, December 2001.
- Pfeiffer, F.:** Applications of unilateral multibody dynamics. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, Nr. 359, pp. 2609-2628, The Royal Society, London, 2001.
- Sedlmayr, M., Pfeiffer, F.:** Dynamik von CVT-Keilkettengetrieben unter Berücksichtigung von räumlichen Effekten, VDI-Berichte 1610, VDI-Verlag Düsseldorf, 2001, pp. 593- 608.
- Sedlmayr, M.; Bullinger, M.; Pfeiffer, F.:** Spatial Dynamics of CVT Chain Drives. VDI- Berichte 1709 „CVT 2002 Congress“, München, 7.-8. Okt., Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2002.
- Pfeiffer, F.; Stieglmayr, A.:** Time Stepping Method for Unilateral Multibody Dynamics. WCCM V Fifth World Congress on Computational Mechanics, Austria, 2002.
- Gienger, M.; Löffler, K.; Pfeiffer, F.:** Design and Realization of Jogging Johnnie. CISM Courses and Lectures No. 438, CISM 2002, Springer-Verlag, Wien, New York, pp. 445-452, 2002.
- Pfeiffer, F.; König, E.:** Modeling Normal and Hemiparetic Walking. Digital Human Modeling Conference, München, 18.-22.6.2002, VDI-Berichte 1675, pp. 33-43, 2002.
- Pfeiffer, F.:** Flüssigkeitsgefüllte Kreisel - ein klassisches Problem, VDI-Berichte Nr. 1682, S. 479-490, 2002, VDI-Verlag, 2002.
- Pfeiffer, F.:** Spatial Motion of CVT-Chains, IUTAM-Symposium, Chaotic Dynamics and Control of Systems and Processes in Mechanics, Rome, 2003.
- Pfeiffer, F.; Haj-Fraj, A.:** Optimal Control of Automatic Transmission, IFAC Nonlinear Control Systems, St. Petersburg, Russia, 2001, pp. 273-282, Elsevier, 2003.
- Pfeiffer, F.:** The Logic of Walking Machine Control, IFAC, Logic Controlled Dynamic Systems, Irkutsk, 2003.
- Pfeiffer, F.; Borchsenius, F.:** New Hydraulic System Modelling, Journal of Vibration and Control 10 (2003), pp. 1493-1515, Sage Publications, 2003.
- Pfeiffer, F.:** The idea of complementarity in multibody dynamics, Archive of Applied Mechanics 72 (2003), pp. 8097-816, Springer Verlag, 2003.

- Pfeiffer, F.:** Unilateral Problems of Dynamics, Virtual Nonlinear Multibody Systems, W. Schielen and M. Valášek (Eds.), pp. 103-140, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Pfeiffer, F.; Lebrecht, W.; Geier, T.:** State-of-the-Art of CVT-Modelling, SAE-CVT-Conference San Francisco, SAE International, 2004.
- Pfeiffer, F.; Zielinska, T.:** Walking: Biological and Technological Aspects, - In: CISM Courses and Lectures No. 467, CISM 2004, Springer-Verlag Wien New-York.

7 Dissertationen, Habilitationen

Hartmut Bremer:

Kinetik starr-elastischer Mehrkörpersysteme. Habilitationsschrift, Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 11, Nr. 53, 1983.

Eduard Anton:

Stabilitätsverhalten und Regelung von parametererregten Rotorsystemen. Dissertation, Fortschritt-Berichte der VDI Zeitschriften, Reihe 8, Nr. 67, VDI Verlag, Düsseldorf 1984.

Michael Gosdin:

Analyse und Optimierung des dynamischen Verhaltens eines PKW-Antriebsstranges. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 69, VDI Verlag, Düsseldorf 1985.

Helmut Brandl:

Schwingungs- und Stabilitätsanalyse für flüssigkeitsgefüllte Kreisel. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 82, VDI Verlag, Düsseldorf 1986.

Heinz Ulbrich:

Dynamik und Regelung von Rotorsystemen. Habilitationsschrift, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 86, VDI Verlag, Düsseldorf 1986.

Ferit Küçükay:

Dynamik der Zahnradgetriebe. Habilitationsschrift, Springer-Verlag, 1987.

Bernd Gebler:

Modellbildung, Steuerung und Regelung für elastische Industrieroboter. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 98, VDI Verlag, Düsseldorf 1987.

Helmut Brandl:

Schwingungsmodelle in der Maschinendynamik. Habilitationsschrift, Lehrstuhl B für Mechanik, Technische Universität München, 1988.

Norman Blanck:

Genaue Roboterregelung entlang vorgegebener Trajektorien. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 165, VDI Verlag, Düsseldorf 1988.

Georg Lachenmayr:

Schwingungen in Planetengetrieben mit elastischen Hohlrädern. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 108, VDI Verlag, Düsseldorf 1988.

Rainer Johanni:

Optimale Bahnplanung bei Industrierobotern. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 18, Nr. 51, VDI Verlag, Düsseldorf 1988.

Ulrich Kleemann:

Regelung elastischer Roboter. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 191, VDI Verlag, Düsseldorf 1989.

Ulrich Hachmann:

Viskose Dämpfung bei flüssigkeitsgefüllten Kreisel. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 118, VDI Verlag, Düsseldorf 1989.

Konstantinos Karagiannis:

Analyse stoßbehafteter Schwingungssysteme mit Anwendung auf Rassel-schwingungen in Getrieben. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 125, VDI Verlag, Düsseldorf 1989.

Eduard Reithmeier:

Periodische Lösungen nichtlinearer Schwingungssysteme. Dissertation, Periodic Solution of Nonlinear Dynamical Systems, Springer-Verlag 1989.

Karl-Heinz Senger (DLR):

Dynamik und Regelung allradgetriebener Fahrzeuge. Dissertation, Lehrstuhl B für Mechanik, Technische Universität München, 1989.

Stefan Türk (DLR):

Zur Modellierung der Dynamik von Robotern mit rotatorischen Gelenken. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 211, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.

Manfred Hajek:

Reibungsdämpfer für Turbinenlaufschaufeln. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 128, VDI Verlag, Düsseldorf 1990.

Sigmund Fürst:

Aktive Lagerabstützung zur Dämpfung elastischer Rotoren. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 132, VDI Verlag, Düsseldorf 1990.

Hubertus Brendel (extern):

Zur Schwingungsdämpfung von Fugenverbindungen. Dissertation, Lehrstuhl B für Mechanik, Technische Universität München, 1990.

Willibald Prestl:

Zahnhämmern in Rädertrieben von Dieselmotoren. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 145, VDI Verlag, Düsseldorf 1991.

Klaus Richter:

Kraftregelung elastischer Roboter. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 259, VDI Verlag, Düsseldorf 1991.

Bernd Behnke:

Dichtungsflattern in Gasturbinen. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 148, VDI Verlag, Düsseldorf 1991.

Mingmin Ren:

Dynamik von Cyclo-Getrieben. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 149, VDI Verlag, Düsseldorf 1991.

Christian Roß:

Strukturoptimierung mit Nebenbedingungen aus der Dynamik. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 38, VDI Verlag, Düsseldorf 1991.

Josef Althaus:

Eine aktive hydraulische Lagerung für Rotorsysteme. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 154, VDI Verlag, Düsseldorf 1991.

Peter Solfrank:

Schallabstrahlung beim Getrieberasseln. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 156, VDI Verlag, Düsseldorf 1991.

Andreas Kunert:

Dynamik spielbehafteter Maschinenteile. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 175, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.

Anton Fritzer:

Nichtlineare Dynamik von Steuertrieben. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 176, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.

Hans-Jürgen Weidemann:

Dynamik und Regelung von sechsbeinigen Robotern und natürlichen Hexapoden. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 362, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.

Kai Sorge:

Mehrkörpersysteme mit starr-elastischen Subsystemen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 184, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.

Shiu-Ying Zheng:

Lernende Regelung für Rotorsysteme. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 184, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.

Eberhardt Franz:

Dynamik von elektromechanischen Präzisionswaagen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 187, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.

Ulrich Hillenbrand (DB):

Optimale fahrtechnische Auslegung von Schienenfahrzeugen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 188, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993

Ilmar F. Santos:

Aktive Kippsegmentlagerung - Theorie und Experiment. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 189, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.

Hubertus Brandt (BMW):

Rechnerunterstützte Gestaltung der Dauererprobungen bei PKW-Automatikgetrieben. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 190, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.

Henner Wapenhans:

Optimierung von Roboterbewegungen bei Manipulationsvorgängen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 304, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.

Josef Hölzl:

Modellierung, Identifikation und Simulation der Dynamik von Industrierobotern. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 372, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.

Wolfgang Seyffert:

Modellierung unstetiger Montageprozesse mit Robotern. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 199, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.

Thomas Jäger:

Hydraulische Ansteuerung und Regelung von Rotorstellgliedern. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 209, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.

Gerhard Wanderer:

Zahnsteifigkeit aus FE-ermittelten Einflußzahlen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 211, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.

Jürgen Eltze:

Biologisch orientierte Entwicklung einer sechsbeinigen Laufmaschine. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 17, Nr. 110, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.

Ferdinand Dirschmid:

Nichtlineare Dynamik von Kopplungen in Rotorsystemen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 216, Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

Werner Breuer:

Radmomentenregelung bei PKWs. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 235, Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

Bernhard Frodl:

Schaufelbelastung durch Pumpen in Verdichtern. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 7, Nr. 259, Düsseldorf: VDI-Verlag .

Thomas O. Connolly:

Cooperating Manipulator Modelling and Control. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 470, Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

Roland Menzel:

Konstruktion und Regelung einer hydraulischen Hand. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 451, Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

Kurt Wölfl:

Planung von Manipulationsvorgängen einer Roboterhand. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 455, Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

Christoph Glocker

Dynamik von Starrkörpersystemen mit Reibung und Stößen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 18, Nr. 182, Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.

Joachim Steinle

Entwicklung einer prozeßangepaßten Roboterregelung für Montagevorgänge, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 548, Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

Jüergen Braun

Einfluß von Preßverbänden auf die Dynamik von Antriebssträngen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 231, Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

Dirk Dennin

Dynamische Profilkorrektur, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 236, Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.

Markus Wösle

Dynamik von räumlichen strukturvarianten Starrkörpersystemen Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 18, Nr. 213, Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.

Sebastian Bauer

Fehlerdiagnose bei Luftfahrttriebwerken, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 250, Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.

Peter Fritz

Dynamik schnellaufender Kettentriebe, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 253, Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.

Volker Hadwich

Modellbildung mechatronischer Systeme, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 704, Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.

Thomas Meitinger

Dynamik automatisierter Montageprozesse, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 476, Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.

Günther Prokop

Optimale Prozeßdynamik bei Manipulation mit Robotern, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 713, Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.

Thomas Roßmann

Eine Laufmaschine für Rohre, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 732 , Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.

Hans-Jürgen Weidemann

Schwingungsanalyse in Motoren und Getrieben. Habilitationsschrift, Lehrstuhl B für Mechanik, Technische Universität München, 1999.

Michael Beitelschmidt

Reibstöße in Mehrkörpersystemen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 275, Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

Jürgen Srnik

Dynamik von CVT-Keilkettengetrieben, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 372, Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

Peter Wolfsteiner

Dynamik von Vibrationsfördern, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 511, Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

Weixing Wu

Aktive Dämpfung von Rotorschwingungen über regelbare Gleitlager, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 278, Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

Thomas Kell

Experimentelle Schwingungsuntersuchungen an Kettentrieben, 1999.

Alexander Schlotter

Dynamik, Regelung und Optimierung eines neuartigen Roboters, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 833, Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.

Falk Wagner

Dynamics of Washing Machines, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 287, Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.

Mark Brandl

Messung von Trockenreibung, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 292, Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.

Henning Bork

Dynamik von CVT- Toridreibradgetrieben, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 450, Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.

Christoph Glocker

Set-Valued Force Laws, Dynamics of Non-Smooth Systems, Lecture Notes in Applied Mechanics Volume 1, Berlin: Springer-Verlag, 2001.

Florian Wegmann

Biegeeweiche Kopplungen in Mehrkörpersystemen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 299, Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

Ali Haj-Fraj

Dynamik und Regelung von Automatik-getrieben, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 489, Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

Andreas Stieglmeyr

Zur numerischen Berechnung strukturvarianter Mehrkörpersysteme, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 18, Nr. 271, Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

Josef Steuer

Autonome Regelung einer sechsbeinigen Laufmaschine, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 954, Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

Christian Lutzenberger

Dynamik des menschlichen Ganges, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 17, Nr. 218, Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

Raphael Burgmair

Modellierung und Optimierung der Dynamik automatisierter Montageprozesses, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 924, Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

Katja Dauster

Prozessangepasste, lernende Roboterregel. f. Montageprozesse, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 925, Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

Joachim Post

Objektorientierte Softwareentwicklung zur Simulation von Antriebssträngen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 317, Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.

Fredrik Borchsenius

Simulation ölhydraulischer Systeme, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 1005, Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.

Martin Sedlmayr

Räumliche Dynamik von CVT -Keilkettengetrieben, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 558, Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.

Martin Schleich

Formgedächtnismaterialien als Fingerantrieb, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 17, Nr. 239, Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.

Kilian Funk

Simulation eindimensionaler Kontinua mit Unstetigkeiten, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 18, Nr. 294, Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.

Markus Bullinger

Dynamik von Umschlingungsgetrieben mit Schubgliederband, Dissertation, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Technische Universität München, 2004.

Markus Weber

Gangtherapie bei Hemiparese mittels funktioneller Elektrostimulation, Dissertation, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Technische Universität München, 2004.

Michael Gienger

Entwurf und Realisierung einer zweibeinigen Laufmaschine, Dissertation, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Technische Universität München, 2004.

Klaus Löffler

Dynamik und Regelung einer zweibeinigen Laufmaschine, Dissertation, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Technische Universität München, 2005.

Andreas Zagler

Dynamik und Regelung eines Rohrkrabblers, Dissertation, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Technische Universität München, 2005.

Andreas Hösl

Erweiterungen zur Dynamiksimulation von Steuerkettentrieben, Dissertation, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Technische Universität München, 2005.

8 CV Pfeiffer

1. Persönliche Daten

22. Februar, 1935 geboren in Wiesbaden, Deutschland
Prof.i.R. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h. Dr.h.c. (RAS)
Friedrich Pfeiffer
Technische Universität München
Lehrstuhl für Angewandte Mechanik
Boltzmannstr. 15, D-85748 Garching
Tel. (089) 289-15200 - FAX: (089) 289-15213
pfeiffer@amm.mw.tum.de

Private Adresse:
Wilhelm-Leibl-Straße 16
D-83607 Holzkirchen
Tel.: 08024-4350, Fax: 08024-475115

2. Ausbildung

1955 Abitur am Realgymnasium am Zietenring,
Wiesbaden
1955-61 TH-Darmstadt, allgemeiner Maschinenbau, Stipen-
dium der „Studienstiftung des Deutschen Volkes“
1961 Dipl.-Ing. Allgemeiner Maschinenbau,
TH-Darmstadt
1965 Dr.-Ing. in Aerodynamik, Institut für Flugtechnik,
TH-Darmstadt (Prof. Dr.-Ing. Günther Bock), sum-
ma cum laude,
(„Abwindkorrekturen für Flügel beliebiger Pfeilung
in offenen und geschlossenen kreisrunden Windkanä-
len mit Bodenplatte“)

3. Berufliche Laufbahn

1966 Entwicklungsingenieur Bölkow GmbH. Ottobrunn,
Unternehmensbereich Raumfahrt (Treibstoffschwap-
pen, Satellitendynamik, Zentrifugendynamik)
1968 Projektleiter Fluidik für ballistische Raketen, Unter-
nehmensbereich Apparate (Schubvektorsteuerung,
Regelungskonzepte für Fluidiks)

1969	Abteilungsleiter für „Theoretische Mechanik“ im Unternehmensbereich Raumfahrt, 18 Mitarbeiter (Satellitendynamik, Treibstoffschwappen, rotierende Fluide, Rendezvous-Manöver, Schwingungsprobleme)
1970	Hauptabteilungsleiter für „Angewandte Mechanik“ im Unternehmensbereich Raumfahrt von MBB, 52 Mitarbeiter (theoretische Mechanik und Raumfahrt-dynamik, Wiedereintrittsdynamik und -regelung, Strukturmechanik; Projekte: COS-B, HELIOS, SYMPHONIE, METEOSAT)
1973	Ruf als Professor für Mechanik an die neu gegründete Bundeswehrhochschule Hamburg abgelehnt
1975	Projektleiter für eine Schiffsabwehr-Lenkrakete (10 Teilprojekt-Manager, rund 60 Mio. DM)
1976	Leiter Technisches Geschäftsführungssekretariat von Dr. Ludwig Bölkow, damaliger Geschäftsführungs-Vorsitzender von MBB
1978	Technischer Geschäftsführer der Bayernchemie GmbH, 350 Beschäftigte, 45 Mio. DM Umsatz (Forschung, Entwicklung und Fertigung von Feststoff-Raketentreibstoffen für gelenkte und ballistische Raketen)
1980	Mitglied der Unternehmensbereichsleitung Apparate, verantwortlich für Forschung und Entwicklung, rund 1000 Mitarbeiter, 200 Mio. DM p.a. (Projekte: alle Lenkflugkörper und ballistische Raketen von MBB)
1982	Ordinarius und Professor für Mechanik an der TU-München, Fakultät für Maschinenwesen, Nachfolger von Prof. Kurt Magnus
1983-2000	Mitarbeit in verschiedenen Ausschüssen der Fakultät und der TU-München
1992-1993	Prodekan der Fakultät Maschinenwesen
1993-1995	Dekan der Fakultät Maschinenwesen und Mitglied des Senats der TU-München
1995-1996	Prodekan der Fakultät Maschinenwesen
1983-	Berater verschiedener Firmen des Automobilbaus und des Maschinenwesens

4. Ingenieur, Wissenschaftler und Manager

- Dissertation über Abwindkorrekturen für Flügel in Bodennähe in offenen Windkanälen, Start - und Landevorgänge (1965)
- Anwendungen des Bellman-Verfahrens (dynamic programming) auf industrielle Probleme der Bauwirtschaft 1965
- Treibstoffschwappen für die ELDO - Trägerrakete (1966)
- Schubvektorsteuerung mit Fluidiks für eine ballistische Rakete mit flüssigem Treibstoff (1968)
- Dynamik rotierender Flüssigkeiten für den ersten europäischen Nachrichtensatelliten SYMPHONIE (1971): Nachweis der Stabilität, Genauigkeit der Zirkularisierung für den geostationären Orbit (zwei Schüsse mit Genauigkeiten besser 0.05%)
- Grundlagen für rotierende Flüssigkeiten mit freien Oberflächen (1974, 1986)
- Technisches Management der METEOSAT - Struktur (1973-74)
- Entwicklung und Fertigung des Airbag - Gasgenerators (als Technischer Geschäftsführer der Bayernchemie, 1978)
- Management von Lenkwaffen-Technologien mit Schwerpunkt Dynamik und Regelung (1980 - 1982)
- Grundlagenforschung über Stöße in Mehrkörpersystemen (ab 1983)
- Erweiterung der Grundlagen der Dynamik im Bereich der Mehrkörpertheorie mit einseitigen Bindungen (Kontakten), inzwischen extrem gewachsen, sehr viele neue Anwendungsfelder (1982 bis heute)
- Erste sechsbeinige Laufmaschine auf der Basis biologischer, besonders neurobiologischer Erkenntnisse (Prof. Cruse) (1986-1993)
- Erste allgemeine Theorie für elastische Roboter, beliebige Freiheitsgrade und beliebige Elastizitäten (1991)
- Erster achtbeiniger Laufroboter für Rohre (1993-1999)
- Computer- und modellgestützte Rehabilitation für Hemiparetiker (zusammen mit Münchner Neurologen), (1996-2004)
- Zweibeinige Laufmaschine JOHNNIE mit Autonomie (Sichtsystem von Prof. G. Schmidt) seit 1999

- Erste verfügbare Modelle für CVT-Ketten und Rollenketten für die Schwingungsanalyse und für akustische Untersuchungen im Automobilbereich (seit 1994)
- Neues Berechnungsverfahren für die Hydraulik auf der Basis von ein- und zweiseitigen Bindungen, Rechenzeitreduktionen um 3-4 Größenordnungen gegenüber klassischen Verfahren (seit 1998)
- Aufbau von Verfahren der Kosimulation mit großen Code - Einheiten (seit 1999)

5. Lehrtätigkeit

Vorlesungen, Übungen und Praktika in den folgenden Bereichen:

- Technische Mechanik I - IV
- Dynamik
- Mehrkörperdynamik und -regelung
- Mechatronik
- Roboterdynamik und -regelung
- Modellbildung in der Dynamik
- Laufmaschinen (CISM)
- Mehrkörperdynamik mit einseitigen Bindungen (CISM)

In 21 Jahren etwa 20.000 Studenten und Prüfungskandidaten, mehr als 80 Promotionen.

6. Akademische Angelegenheiten, Ausschüsse

1970 - 2002	Mitglied des Auswahlausschusses der Studienstiftung des Deutschen Volkes
1984-2000	Mitglied des Fachbereichsrates
1984-2001	Mitglied des Vordiplom-Prüfungsausschusses
1987-93	Vorsitzender des Vordiplom-Prüfungsausschusses
1993-95	Mitglied des Steuerungsausschusses für den Neubau der Fakultät Maschinenwesen in Garching
1995-	Mitglied des Kuratoriums der Dr. Carl-Arthur Pastor-Stiftung für den Aachener und Münchner Preis für Technik und angewandte Naturwissenschaften
1996-	Member of Scientific Council of CISM, Udine, Italy, (Centre International des Sciences Mechaniques)

1996-2002	Mitglied des Senates der Deutschen Forschungsgemeinschaft
2002-2004	Präsident der GAMM (Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik)

7. Organisation von Konferenzen

- 1990:
EUROMECH-Kolloquium 268 „Dynamics and Control of Flexible Structures“, München, Sept. 11 - 14, 1990 (Chairman and Organizer)
- 1991:
1st European Solid Mechanics Conference (1st ESMC), München, Sept. 9 - 13, 1991 (Chairman and Local Organizer)
- 1995:
IFAC Motion Control, München, October 9 - 11, 1995 (Chairman and Local Organizer)
- 1995:
„Kinematik und Robotik“, Oberwolfach, December 11 - 15, 1995 (Organizer together with Bock, Heidelberg, Hoschek, Darmstadt und Hiller, Duisburg)
- 1997:
GAMM-Tagung Regensburg, 24. - 27. 03. 1997 (Co-Organizer and Co-Chairman with Prof. Mennicken, Regensburg)
- 1995, 1998, 2001, 2003 ...:
VDI-Schwingungstagung „Schwingungen in Antrieben“, etwa alle 3 Jahre, mit großer Industriebeteiligung (Tagungsleitung, Organisation beim VDI)
 - Veitshöchheim 25./26.09.1995
 - Frankenthal 10./11.09.1998
 - Würzburg 18./19.09.2001
 - Fulda 02./03.03.2003
- 1998:
EUROMECH-Kolloquium „Biology and Technology of Walking“, München, March 23 - 25, 1998 (Chairman and Organizer together with Prof. Cruse, Bielefeld)
- 1998:
IUTAM-Symposium „Unilateral Multibody Dynamics“, München, August 3 - 7, 1998 (Chairman and Organizer together with Prof. Glocker)

- 1998:
CISM-Course on „Multibody Dynamics with Unilateral Contacts“, Udine, Italy, September 28 - October 2, 1998 (Chairman and Organizer together with Dr.-Ing. Glocker, Munich)
- 1999:
„Geometry and Multibody Mechanics: Nonlinear Dynamics and Control“, Oberwolfach, 25. - 30. Juli 1999 (Organizer together with Marsden, Berkeley, and Scheurle, München)
- 2003:
CISM-Course on „Walking - Biological and Technological Aspects,, Udine, Italy, September 8-12. 2003 (Chairman and Organizer together with Prof. Zielinska, Poland)
- 1982 -:
Activities in international conferences as session organizer, session chairman, member program committees, lecturer, plenary and keynote lecturer (ASME, IUTAM, IEEE, WAC, GAMM, EUROMECH, ICIAM)

8. Mitgliedschaften

- VDI (Verein Deutscher Ingenieure)
- GAMM (Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik) (Präsident)
- DGLR (Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt)
- Deutscher Hochschulverband
- EUROMECH (European Society of Mechanics, former member of the council, former chairman of the standing committee of ENOC (European Nonlinear Oscillations Conference), member of EUROMECH Advisory Board)
- IUTAM (International Union of Theoretical and Applied Mechanics), member of the Working Party WP2 on „Dynamical Systems and Mechatronics“ XS (2002 -)
- IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Fellow, USA)
- ASME (American Society of Mechanical Engineers, Fellow, USA), member of the ASME Technical Committee on Multibody Systems and Nonlinear Dynamics (2003)

9. Herausgeberfunktionen für Bücher und Fachzeitschriften

- Chief-Editor
 - Archive of Applied Mechanics, Springer Verlag, 1996-2004 (ab 2004 wieder Associate Editor)
- Associate Editor or Co-Editor
 - Ingenieur-Archiv, Springer Verlag (until 1996)
 - Nonlinear Dynamics, Kluwer Verlag (since 1989)
 - Machine Vibration, Springer Verlag (1990 - 95)
 - Chaos, American Institute of Physics (1990 - 95)
 - European J. of Solid Mechanics, Gauthier Villars (1993 - 2000)
 - Autonomous Robots, Kluwer Verlag (1993 - 97)
 - Journal of Vibration and Control, Sage (since 1995)
 - Intelligent Control and Systems, World Scientific (since 1996)
 - The Royal Society, A-Side Editorial Board for the Philosophical Transactions (since 1998)
 - Nonlinear Science and Numerical Simulation, Elsevier, since 2002
 - Meccanica, Italy, Kluwer, since 2004
 - ASME Applied Mechanics Reviews (AMR), since 1995
 - Book - Series LNACM (Lecture Notes on Applied and Computational Mechanics), Springer Publishing House, since 2000, since 2003 together with Prof. Wriggers, Hannover
 - Book - Series Mathematical Modelling: Theory and Applications, Kluwer Publishing House, since 1997

10. Auszeichnungen

- Verschiedene Preise für besten Konferenzbeitrag
- Verschiedene Preise für Diplomanden und Doktoranden, beste Dissertationen bzw. Diplomarbeiten
- Bordoni Preis 1990, Rom (IFIP)
- Senior Member IEEE, 1991
- Körber Preis für die Europäische Wissenschaft 1993
- BWM Scientific Award für beste Promotion 1993 (1. Preis Dr.-Ing. Anton Fritzer)
- Rudolf Schmidt-Burkhardt Preis für beste Promotion 1993
- FAG-Preis für beste Dissertation 1994

- Ehrendoktor (Dr. h. c.) der Russischen Akademie der Wissenschaften (RAS), Moskau (1998)
- Honorar - Professor der Tongji-Universität Shanghai (1999)
- Mitglied des ISTITUTO LOMBARDO; Academia de Scienze e Lettre, Milano, 2000
- Bundesverdienstkreuz am Bande der Bundesrepublik Deutschland, 2000
- BMW Scientific Award für beste Promotion (3. Preis Dr.-Ing. Henning Bork), 2001
- Ausländisches Mitglied der Russischen Akademie der Wissenschaften (RAS), Moskau, 2003
- IEEE Fellow, 2003
- Dr.-Ing. E.h. Technische Universität Dresden, 2004
- ASME Fellow, 2004
- Ehrenplakette des VDI (Verein Deutscher Ingenieure), 2004

11. Veröffentlichungen

- Mehr als 200 Veröffentlichungen in internationalen Fachzeitschriften und in Tagungsproceedings, 5 Bücher, mehrere Buchbeiträge
- bis 2004 mehr als 80 Promotionen von Mitarbeitern